

研 究

3.4.4 データ解析ソフトウェア

小山 泰弘*¹ 高橋 幸雄*¹ 後藤 忠広*¹ 日置 幸介*²

(1995年10月16日受理)

3.4.4 DATA ANALYSIS SOFTWARE

By

Yasuhiro KOYAMA, Yukio TAKAHASHI, Tadahiro GOTOH, and Kosuke HEKI

The data analysis software of the Key Stone Project was designed to be easy-to-use, and highly automated. After cross-correlation and bandwidth synthesis of all observation data, a single action of the operator causes X-band and S-band databases to be created and analyzed, and the results interpreted automatically. Only if errors occur or if the estimated results are not reasonable, the operator is notified and the database is investigated with the operator-friendly Graphical User Interface. Interested researchers can access the latest results on the Internet. More than 100 experiments have been processed with the software, and regular processing began on the daily basis from December 1, 1995. The results agree with those obtained by the old software.

[キーワード] 宇宙測地, VLBI, データ解析.

Space geodesy, VLBI, Data analysis.

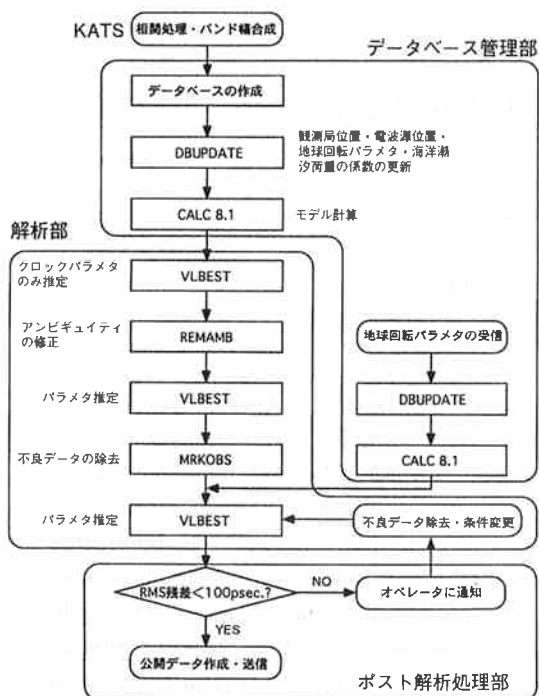
1. はじめに

超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) のデータの処理と解析には、従来、実験実施から短い場合で数日、大規模な国際実験の場合には数ヶ月の時間を要するのが普通であった。しかし、首都圏広域地殻変動観測計画 (Key Stone Project, KSP) では、4局6基線の実験を毎日定常的に実施し、できるだけ短期間でその解析結果を得ることが要求される。そのため、KSPのデータ解析ソフトウェアでは、ほとんど解析を行う研究者の操作を必要としない、可能なかぎりの自動化を図ることとした。反面KSPで得られる解析結果は、首都圏直下型地震の予兆現象を検出して地震予知に役立つデータを提供することが目的であり、公表されるデータは高い精度とともに高い信頼性、すなわち誤った解析結果を公表しないこと、が要求される。そのため、自動解析の結果が妥当かどうかをソフトウェア自身で判定して、結果が正しくないと判断した場合にはオペレー

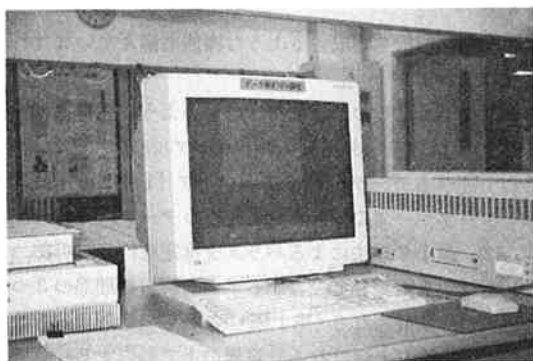
タに詳細な解析を要求するような機能も備えていなければならない。

本論文では、このような特徴をもつように開発されたKSPのVLBIデータ解析ソフトウェアについて述べる。ここで述べるデータ解析ソフトウェア「武甕槌」*¹は、(1) データベースの作成と更新を行うデータベース管理部、(2) 最小2乗法によるパラメタ推定を行う解析部、(3) 解析結果を編集して公表するポスト解析処理部の3つの部分から構成される (第1図)。これらの処理は解析計算機 (第2図) と呼ばれる計算機の上で動作する。解析計算機の諸元を第1表に示す。本論文では、まず、2章で「武甕槌」の各々の部分について、ソフトウェアの構成とその機能について述べる。さらに、3章では、実際にこのデータ解析ソフトウェアを用いた結果を示し、従来のソフトウェアで解析された結果との比較などを行う。

*¹ 関東支所 宇宙電波応用研究室*² 国立天文台 地球回転研究系*¹ Key Stone Project の名前のもとになった鹿島神宮の要石にまつわる逸話に登場する人物の名前から名付けた。



第1図 データ解析ソフトウェアの処理手順のフローチャート。長方形で囲まれた部分はプログラムを示す。



第2図 データ解析計算機 (HP 9000 model 715/100)。

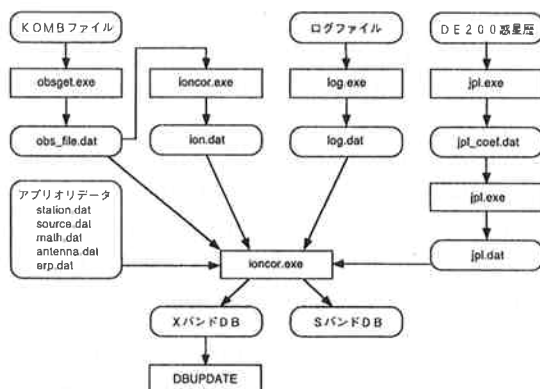
2. 解析ソフトウェアの構成と機能

2.1. データベース管理部

KSPのVLBIデータ解析では、Mark-IIIデータベースと呼ばれるデータベースシステムを採用している。Mark-IIIシステム⁽¹⁾は、米国航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)の地殻力

第1表 データ解析計算機の諸元

計算機	HP9000 model 715/100
オペレーティングシステム	HP-UX 9.05
ネットワーク	Ethernet, TCP/IP, 2ポート
表示装置	19インチカラーコンソールディスプレイ
記憶媒体	ハードディスク (3.78 GByte) DATドライブ CD-ROMドライブ
周辺機器	無停電電源装置 カラープリンタ (HP PaintJet XL300)



第3図 データベースの作成フローチャート。長方形で囲まれた部分は処理をおこなうプログラム、角の丸い枠で囲まれた部分はファイルを示す。

学プロジェクト (Crustal Dynamics Project, CDP) のもとで開発されたシステムであり、このデータベース方式を採用することで一般の研究者にデータを供給する際の互換性を保つことができ、またCALCと呼ばれるモデル計算プログラムをそのまま使用することが可能となる。

KSPのVLBIデータは、小金井中央局に設置された相関器⁽²⁾によって、データ処理ソフトウェアKATS⁽³⁾を用いて処理され、1つの観測ごとに1つのKOMBファイル⁽⁴⁾が作成される。その後、KATSのデータベース作成部起動画面から「武甕槌」のデータベース作成部が起動され、XバンドとSバンドのそれぞれのデータベースが作成される。その際のソフトウェアの動きを第3図に示す。図に示されるように、データベースが作成されるまでには4つの独立したプログラム (obsget.exe, ioncor.exe, log.exe, jpl.exe) が動作し、各々1つの中間ファイルが作成される。この4つの中間ファイル

と6つのアプリアリ情報の格納されたファイルから、PUTM3によってXバンドとSバンドの2つのデータベースが作成される。中間ファイルを作成する4つのプログラムはデータ処理計算機で起動され、出力されるファイルはデータ処理計算機のディスク上に作成される。中間ファイルが作成されるディレクトリとアプリアリファイルの入っているディレクトリは、NFS (Network File System) を使用してデータ解析計算機にもマウントされているため、PUTM3がデータ解析計算機上で動作するときには直接接続されたディスクと同様にアクセスすることができる。小金井中央局には、観測の集中監視とデータ処理・解析を行うオペレータが常駐するが、相関処理が終わったあとオペレータが行う必要のある作業は、「KATS」のデータベース起動画面の開始ボタンをマウスで選択するだけである。あとは、順に「武蔵榎」のプログラムが起動されて、自動的にデータベースが作成される。

Sバンドのデータベースは、相関強度を調べるなどの目的でのみ使用されるので、作成されたデータベースはそのままにして処理は終了する。一方、Xバンドのデータベースは、作成されたあとすぐに解析に必要な処理が行われる。まず、DBUPDATEで地球回転パラメタ、局位置、電波源位置、海洋潮汐荷重に関する係数の各アプリアリ情報を更新し、さらにCALCでモデル計算を行って最小2乗推定に必要な偏微分行列を作成する。ここまでの処理が正常に行われたことが確認されれば、次節で述べる解析部に処理を移して自動解析が行われる。DBUPDATEで更新されるアプリアリ情報は、海洋潮汐荷重の係数を除いてPUTM3で作成されるときに使用される値と同じものが用いられる。また、DBUPDATEでは、あとで述べるVLBESTで使用される局位置ファイル、時系オフセット推定パラメタ設定ファイルを作成し、各観測の基線ごとの相関強度のデータをファイルに出力する。

KSPでは、実験が行われてから1~2日以内に最初の解析が行われるが、そのときには高精度な地球回転パラメタは利用できない。地球回転パラメタとは、地球の自転軸の極軸からのずれ($\delta x, \delta y$)、協定世界時と世界時および国際原子時との差(UT1-UTC, UTC-TAI)、地球自転軸の天空における方向を示す歳差と章動のIAUモデル⁽⁵⁾からのずれ($\delta\phi, \delta\epsilon$)を言うが、これらの値はVLBIやGPS (Global Positioning System)、SLR (Satellite Laser Ranging)、LLR (Lunar Laser Ranging)の国際観測のデータを使用して総合的に推定されている。しかし、すでに述べたように通常のVLBI実験の処理には少なくとも数日の時間を要し、ほかの技術の

観測で得られる結果も公表されるまでに時間がかかるので、KSPの解析時には過去の地球回転パラメタの変化から予測された予測値しか利用できないことになる。この予測値は、国際地球回転事業 (International Earth Rotation Service, IERS) が毎週1回発行するBulletin Aによって公表される。初期解析で使用された予測値は、1週間後に発行されるBulletin Aで更新され、さらに毎月1回発行されるBulletin Bで2回更新される。更新されるごとに新しい観測結果が取り入れられるので、精度はあとになるほど向上する。VLBI実験のデータ解析では、観測局の間の距離を表わす基線長の推定結果は地球回転パラメタの精度に影響されないが、観測局の3次元位置の推定結果は直接地球回転パラメタの誤差の影響を受ける。したがって、KSPの実験データは、最初の解析を行ったあとIERSのBulletinが公表されるたびに新しい地球回転パラメタを用いて再解析を行う必要がある。この処理を自動化するため、「武蔵榎」のデータベース管理部ではPerlと呼ばれるプログラム言語で作成したルーチン(mlr.pl)を開発した。mlr.plでは、IERSのBulletinをインターネットの電子メールで受信し、受信したメールを自動的に処理して地球回転パラメタファイル(erp.dat)を更新する。そのとき、どの日付の地球回転パラメタが更新されたのかを調べ、該当する日に対応するデータベースをすべて更新して再解析を行う。このようにして、常にそのとき利用できる最新の地球回転パラメタを用いた解析処理が自動的に行われる。また、これとは別に、IERSではAnnual Reportによって1年分の地球回転パラメタや最新の電波源位置と局位置が公表しているが、その場合でも、erp.datをマニュアルで編集して準備すれば、複数の実験を一度に指定してデータベースの更新と再解析を行うことができる機能も備えられている。

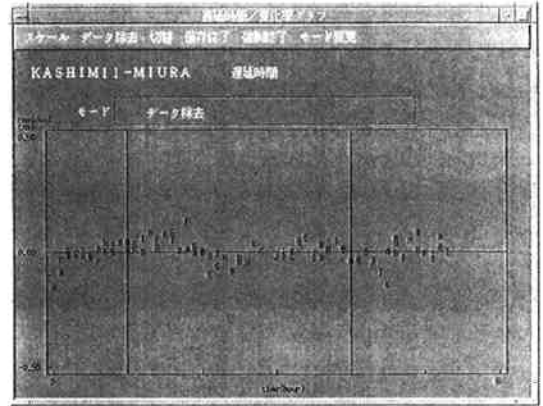
2.2. 解析部

データベースが新規に作成されたり、データベースの地球回転パラメタが更新されたときには、基線解析処理が自動的に起動される。新規のデータベースの場合には、まずアンビギュイティの除去(REMAMB)が行われる。アンビギュイティは、バンド幅合成の精決定サーチ関数⁽⁶⁾が周期関数になるために生じる遅延時間の解の不定性であり、各観測チャンネル間の観測周波数差の最大公約数の逆数で与えられる。最初に作成されるデータベースには、アンビギュイティの整数倍だけ正しい値と異なるデータが含まれている可能性があり、これを修正する処理が必要である。従来、この処理は解析者が行っていた作業であるが、「武蔵榎」ではこの処理をはじめて自動化した。そのため、まずVLBESTで基準局以

外の観測局の時系のオフセットとその変化率だけをパラメタとして推定し、その結果得られる観測ごとの遅延時間の残差を最小にするようにアンビギュイティの整数倍の値を増減して修正を行う。

次に、アンビギュイティの修正されたデータをもとにしてVLBESTを実行して、残差の大きな観測データを不良データとして解析からとりのぞく処理をMRKOBSで行う。MRKOBSでは、あらかじめ設定された閾値より残差の大きな観測データをすべて不良データとみなす。閾値は解析者が自由に設定することが可能であるが、現在は100 psに設定している。REMAMBとMRKOBSで処理された結果は実験ごとにアスキーファイルと呼ばれるにファイルに保存され、再解析を行う際にはこのファイルの情報が使用される。アスキーファイルには、アンビギュイティの大きさと遅延時間データに加算されるアンビギュイティの数、遅延時間と遅延時間変化率のそれぞれについてデータが正常であるか異常であることを示すフラグが観測ごとに記述されている。フラグの数字によって、データベースを作成するとき不良データと判断されたデータであるか、MRKOBSや解析者が操作をしてフラグを設定したデータであるかを判別することができる。また、Xバンドのデータだけが得られて、Sバンドのデータがない場合には、電離層遅延の補正ができないことを示すフラグがセットされる。アスキーファイルはテキストエディタなどで編集することができ、また「武甕槌」のマニュアル解析画面でも視覚的ユーザーインターフェース（Graphical User Interface, GUI）を用いてデータの削除と復活とを簡単な操作で編集することもできる（第4図）。

MRKOBSで不良データが削除されたあと、再度VLBESTが実行されて最終的な解析結果が得られる。得られた解析結果はあとで述べるポスト解析処理部に渡され、公開データを作成するための処理が行われる。ここでは、まず解析結果が正常かどうか遅延時間データの残差の平均2乗和の平方根（Root Mean Squared, RMS）を設定値と比較することによって判断され、解析結果が正常でないと判断された場合には解析者に電子メールを送信して通知する。解析者は通常はまったく解析部の操作を行わないが、この電子メールによる通知を受けたときのみ観測データの詳細な解析を行う。解析結果が正常でないことの原因は、使用できるデータ数が非常に少ないこと、アンビギュイティの修正が正しく行われなかったこと、水素メーザーによって維持されている観測局の時系の不連続があったことなど様々な可能性がある。解析者は、「武甕槌」のマニュアル解析画面でその原因を特定し、解析条件を変化させながら正常な解析解



第4図 マニュアル解析画面のデータ削除・復活操作ウィンドウ。マウスによる操作でデータフラグの編集や、クロックオフセットパラメタの設定時刻を編集することができる。

が得られるまでパラメタ推定を繰り返す。このようにすることによって、通常はほぼ自動的に解析結果を出力する一方で、なんらかの原因によって誤った解析結果が公表されることがないように設計されている。誤った解析結果が地震の前兆として誤解されると、その影響は甚大であるので、こういった機能は必須である。

基線解析の中心となるパラメタ推定が行われるのは、VLBESTのルーチンである。VLBESTでは、先に述べたアスキーファイルと、観測データの格納されたバイナリファイル、解析条件を指定する入力ファイルと各種のアプリオリデータファイルを使用して、推定パラメタの最小2乗推定を行う。推定されるパラメタには、基準局を除く観測局の座標の3成分、天頂方向に換算した大気遅延時間、各局の時系の基準局に対する差（クロックオフセット）がある。電波源位置と地球回転パラメタも未知数として推定することは可能であるが、KSPでは観測局の位置を正確に推定することが目的であるので、これらのパラメタは既知として固定する。地球回転パラメタはIERSのBulletinによるEOP 90 C 04モデルに準拠した値、電波源位置はICRF（IERS Celestial Reference Frame）、基準局の局座標はITRF（IERS Terrestrial Reference Frame）の値をそれぞれ用いる。これらの値は、IERS Standards (1992)⁽⁷⁾として定義されており、ITRFとICRFの具体的な値はIERSのAnnual Report⁽⁸⁾として毎年更新されている。このように、アプリオリとして与える値をIERS Standardsに統一することは、各固定パラメタの間の整合性を保つ上で重要である。基準局として局座標の3成分を固定するのは、通常は鹿嶋局、鹿嶋局が実験に参加していない場合は小金

井局が選択される。これらの局は、1995年1月19日に鹿島宇宙通信センターの34mアンテナをまじえた実験を行っており、そのときに得られた基線ベクトルと34mアンテナのITRFにおける座標からアプリアリの座標値が与えられる。

パラメタ推定で与える観測量には、VLBIデータのデータ処理の結果得られる遅延時間データを使用し、遅延時間変化率は原則として使用しない。これは、KSPの観測における1つの電波源に対する観測時間が非常に短く、十分な精度の遅延時間変化率が決定できないためである。最小2乗推定における観測方程式を、

$$y_0 \cong y_c = Ax \quad \dots\dots(1)$$

として表わすとき、 x が推定パラメタ、 y_0 が観測量である遅延時間のデータ、 A がモデル計算を行うCALCによって得られるヤコビアン行列である。通常の最小2乗条件は $\sum_i (y_{oi} - y_{ci}) / \sigma_i^2$ を最小にするように与えられるが、VLBESTではここに大気遅延とクロックオフセットに関する束縛条件を加えた

$$\sum_i (y_{oi} - y_{ci}) / \sigma_i^2 + \sum_j (a_j - a_{j-1}) / \alpha^2 + \sum_j (c_j - c_{j-1}) / \beta^2 \quad \dots\dots(2)$$

を最小にするように与えられる。ここで、 σ_i は x_i の正規誤差、 α と β はそれぞれ大気遅延とクロックオフセットの束縛条件を決める定数である。大気遅延とクロックオフセットの値は、実験を行った時間をいくつかのエポックで区切り、それぞれのエポックにおける値(a_j と c_j)を結ぶ折線によって表現する。束縛条件として与える α と β の値を小さくすれば急激な変化が生じないような束縛が加えられた解が得られる。これは、束縛条件なしで短い時間間隔のエポックで大気遅延とクロックオフセットを推定しようとした場合、実際の値の変化を折線で近似することによる不自然な解が得られることを防ぐためである。VLBESTでは、この条件から得られる正規方程式を、Cholesky分解⁹⁾を用いて解き、 x の推定値を計算する。

2.3. ポスト解析処理部

解析部でデータ解析が終了すると、ポスト解析処理に関連するルーチンが起動され、気象庁をはじめ外部の研究者にデータを公表するための処理を行う。外部に公表されるデータは、インターネットを通じて、anonymous FTP (File Transfer Program), WWW (World Wide Web), 電子メールの3つの形態で提供され、おもに地震予知のための基礎データとして活用される。また、電波源の相関強度のデータも副産物として得られるが、この結果は天文学にとっても貴重なデータとして利用される可能性がある。

KSPのVLBI実験の解析で得られるのは、基準局以

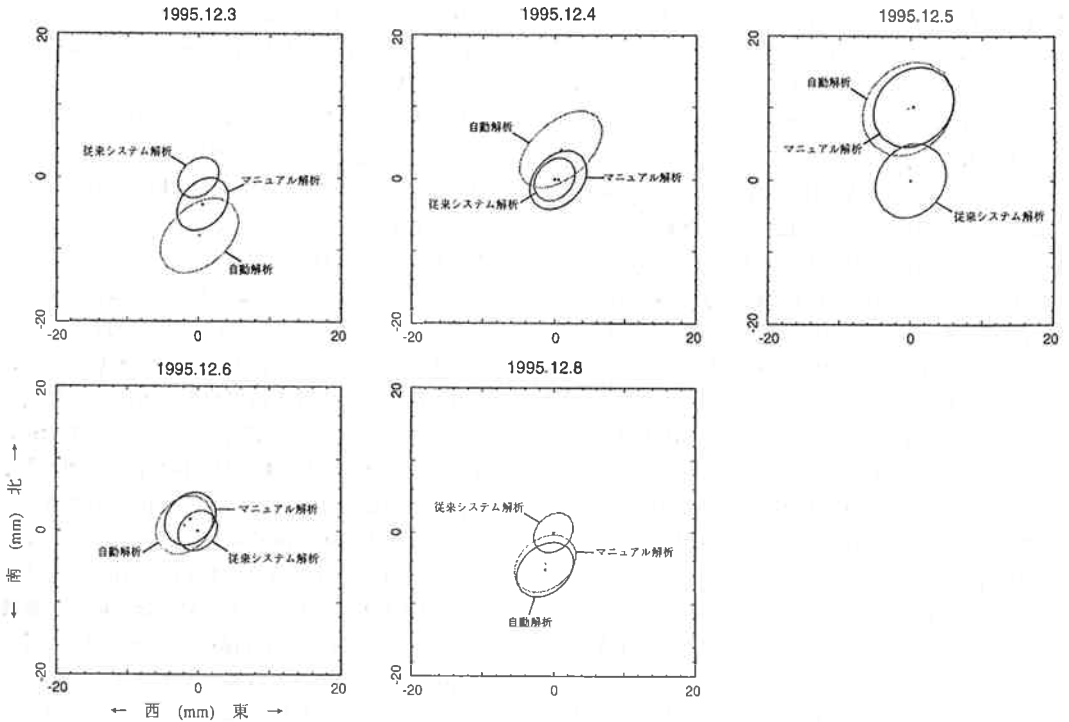
外の観測局のXYZ座標系における3成分である。はじめに、このデータを水平面内と鉛直方向の変動成分に変換したり、観測局間の距離すなわち基線長データに変換する処理が行われる。これらのデータからは、さらに過去のデータも含めて最小2乗推定によって1995年1月1日原点における値と1次変化率が推定され、過去のトレンドに対して異常な変動がないかどうかを調べる。得られた結果は、一般に利用されやすいようにテキストファイルとして出力されるとともに、Postscript形式とGIF形式のグラフィックファイルとして出力される。また、テキストファイルで過去60日分の解析データ報告と、JLaTeXによる解析結果報告とが同時に作成される。テキストファイルの報告書は電子メールで指定されたアドレスに送信され、またJLaTeXによる報告書は、JLaTeXで整形されて、さらにdvi2psと呼ばれるプログラムでEPSF (Encapsulated PostScript Format)形式のグラフィックスを組み込んだPostscriptファイルとして出力される。これらの解析結果は、解析計算機のanonymous FTP領域に自動的にコピーされて外部から自由にアクセスできるほか、WWWサーバによってインターネット上に提供され、Mosaicなどのブラウザと呼ばれるソフトウェアを用いて外部から自由にアクセスすることができる。

3. 議論と考察

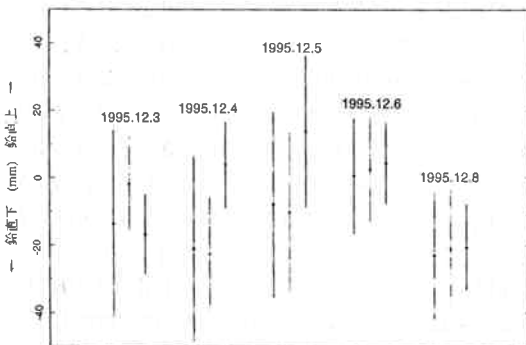
3.1. 定常観測での自動解析

KSPの4つの観測局のうち、館山局を除く3つの観測局による定常観測が1995年12月1日より開始された。小金井局と鹿嶋局の2局を用いた実験は、1995年1月31日からほぼ連日のペースで行われてきたが、相関処理は鹿島宇宙通信センターのK-3相関器¹⁰⁾で行われていた。定常観測では、休日も含めて毎日観測を行い、観測データは小金井中央局のKSP相関器で処理されている。1996年1月の段階ではまだ相関器を含めた処理システムが開発段階であるため、処理できるデータは3つの基線のうち1基線のデータに限られているが、はじめて実際のデータによってREMAMBやMRKOBSの機能を確認することができた。これまでのところ、REMAMBによるアンビギュイティー修正とMRKOBSによる不良データの除去処理はほぼ正確に機能している。

第5図および第6図に、1995年12月3日から6日および8日に実施された実験について、自動解析で得られた結果と、マニュアル解析によって得られた結果、さらに従来のシステムで処理した結果とを比較する。マニュアル解析では、アンビギュイティーの修正と不良データ



第5図 自動解析とマニュアル解析，従来のシステムによる解析結果の比較。小金井局の水平面内における位置推定結果。原点は従来の処理・解析システムによる解析の結果得られた値にとった。



第6図 自動解析とマニュアル解析，従来のシステムによる解析結果の比較。小金井局推定位置の鉛直成分。それぞれの実験について、左から自動解析，マニュアル解析，従来のシステムによる解析の結果を示す。原点は ITRF 93 座標系における小金井局の位置にとった。

の削除とを推定残差をもとにマニュアルで行い，その後 VLBEST でパラメタ推定を行った。従来のシステムによる解析では，鹿島宇宙通信センターの K-3 相関器でデータを処理し，HP 1000/A 900 計算機の上でバンド幅合成処理とデータベースの作成とを行い，その後 HP 9000 ワークステーションに転送してパラメタ推定を行った。パラメタ推定には，米国航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) のゴダード宇宙飛行センター (Goddard Space Flight Center) で開発された解析ソフトウェア SOLVE を用いた。アプリオリとして与えたパラメタは3つの解析で共通になるよう同じ値を使用し，地球回転パラメタには 1996 年 1 月 3 日に発行された IERS Bulletin B の値を使用した。図では，解析の結果得られた小金井局の局位置を，水平面内に投影した位置と鉛直成分とに変換した。原点には，第5図ではそれぞれの実験で従来の処理・解析システムで得られた結果を，第6図では ITRF

第2表 1995年12月の定常実験における自動解析の結果

実験日	解析に使用した観測数/相関処理観測数		
	自動解析	マニュアル解析	従来システムの解析
1995.12.3	58/86	78/86	97/101
1995.12.4	61/82	74/82	97/101
1995.12.5	79/89	80/89	94/100
1995.12.6	78/84	80/84	95/98
1995.12.8	71/77	72/77	94/99

第3表 1995.12.5に行われた実験の処理時刻

12/5 10:00 (JST)	観測開始
12/5 15:19 (JST)	観測終了(観測数:104)
12/5 16:00 (JST)	観測テープの回収と発送
12/6 9:48 (JST)	相関処理開始
12/6 14:28 (JST)	最後の観測の相関処理
12/6 14:30 (JST)	データベース作成処理の起動
12/6 14:43 (JST)	すべての解析処理の終了

93座標系における小金井局の位置の値を用いた。水平面内における局位置と鉛直成分には、それぞれ 1σ の正規誤差を表わす領域が示されている。3つの解析結果は、ほとんど正規誤差の領域内で重なりあっており、有為な差は見られない。第2表に、各実験で相関処理された観測の数と、それぞれの解析で実際に使用されたデータ数とを示す。自動解析では、残差が設定値を超えた観測をすべて不良データとみなして削除してしまうので、マニュアル操作で不良データを削除した場合に比べて常に多めにデータを削除する傾向がある。両者の差を最小にするためには、実際の実験データを用いながら残差の許容設定値を現在の設定値(100 ps)より増加させる必要があると考えられる。しかし、第5図と第6図に示された比較によると、解析に使用された観測数にある程度の差があったとしても、解析結果には有為な差がないことがわかる。この結果は、「武蔵植」の自動解析機能が期待されたとおりの成果をあげていることを示している。

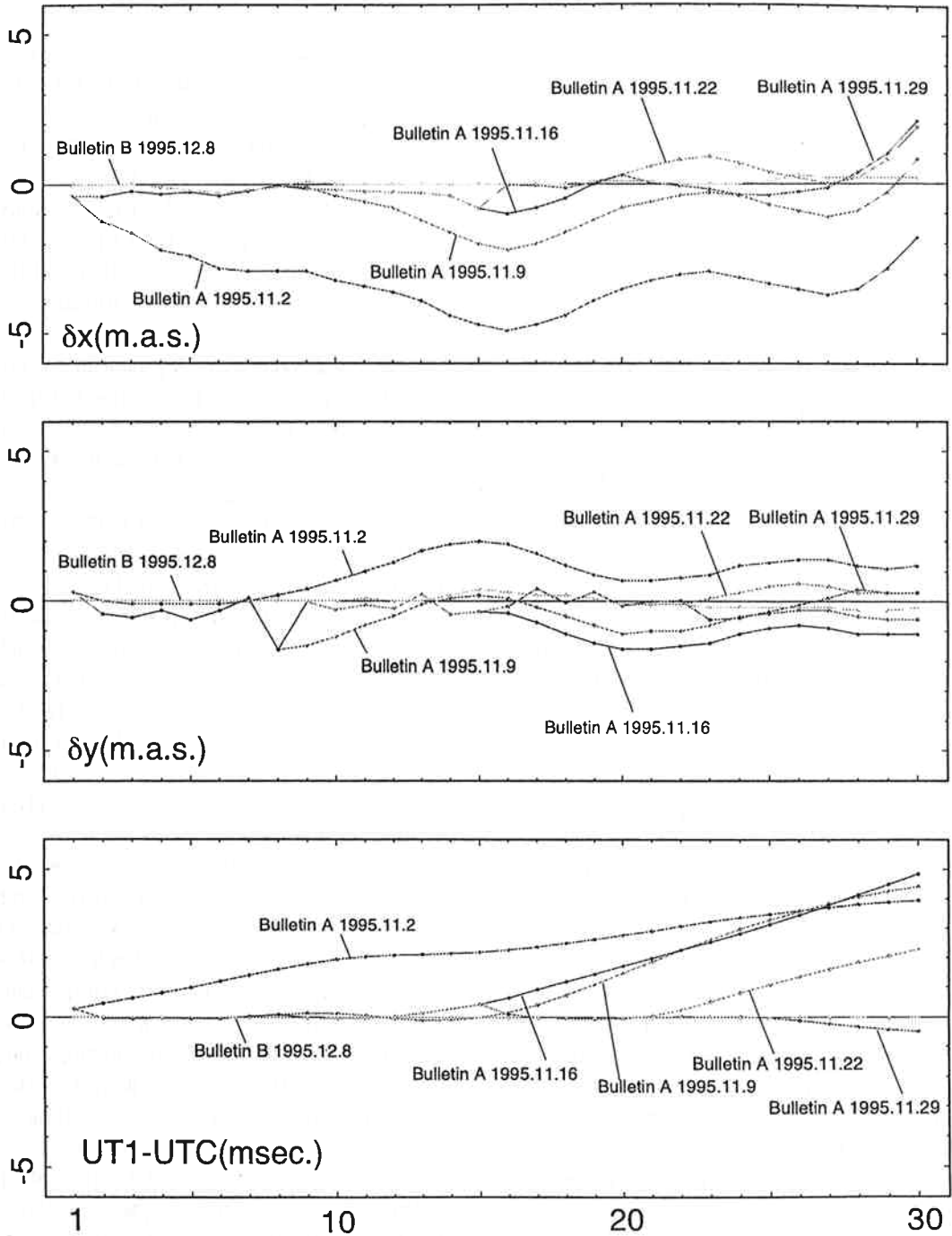
1995年12月1日から始まった定常観測の処理では、いくつかの実験で観測終了から1日以内に解析処理をすべて終えることに成功した。その一例として、第3表に12月5日に実施された実験が解析されるまでの時間経過を順を追って示す。これは、データ解析システムだけではなく、相関処理システム、自動運用システムの連携によって達成されたものであるが、1基線のみ処理な

がら、実験後速やかに解析結果を出すというKSPの第一の目標が達成されたと言うことができる。

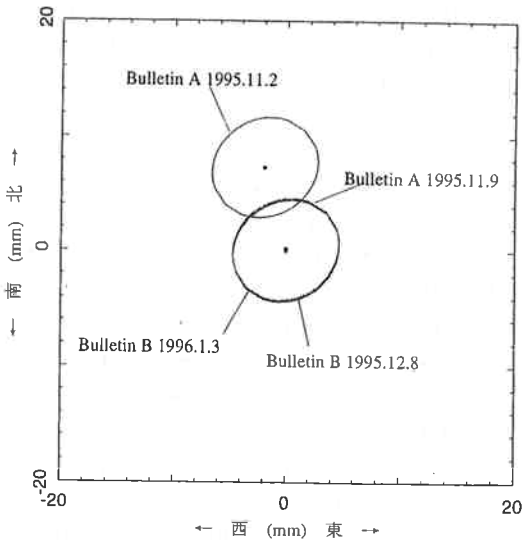
3.2. 地球回転パラメタの精度の影響

前章で述べたように、地球回転パラメタの値に誤差があれば、得られる観測局位置の推定値が直接影響を受ける。実験直後に処理を行うKSPのVLBI実験では、処理を行うときに利用できる地球回転パラメタに予測誤差が伴うので、推定された観測局の3次元位置から地震の予兆を検出するには注意が必要である。この地球回転パラメタの誤差に伴う影響を実際の実験データを用いて調べるため、異なる地球回転パラメタを使用して解析を行い、その結果を比較した。解析には、1995年11月7日の実験データを使用した。1995年11月の地球回転パラメタのうち、極運動を示す δx および δy とUT1-UTCについて、発表された日によってBulletinの値が更新された様子を第7図に示す。図では、1996年1月3日に発行されたIERS Bulletin Bの値を基準として、それ以前に発行されたBulletin AとBulletin Bの値の差を示している。1995年11月7日の実験データは翌日処理されたが、そのときに利用できたのは11月2日に発行されたBulletin Aの予測値である。この値は、その後11月9日に発行されたBulletin A、12月8日と1996年1月3日に発行されたBulletin Bで順次精度の高い値に更新されている。この4つのBulletinの値を使用して解析した結果を第8図および第9図に比較する。図では、得られた小金井局の局位置を水平面に投影したものと鉛直成分とで示している。原点には、1996年1月3日のBulletin Bで解析した結果をとった。水平面内の誤差楕円と鉛直成分の誤差範囲は、推定によって得られた正規誤差の領域を示す。

水平面内の位置と鉛直成分とも正規誤差の範囲内ですべての結果が一致しているが、1995年11月2日のBulletin Aによる結果には、他の3つの解析結果に対して11.6 mmの差が見られる。誤差の大きな地球回転パラメタを用いた解析結果が、1995年11月9日のBulletin A以降改善された結果であると考えられる。KSPのVLBI実験では、記録レートを現在の64 Mbps (bit per second) から256 Mbpsに増やし、観測数も4倍にすることで局位置の推定精度を向上させることを目指しているが、そのときここで述べたような10 mmを超える系統誤差は無視できない量になると考えられる。基線長の推定は地球回転パラメタの誤差の影響を受けないので、初期解析の結果は基線長データを主に用いることにするか、またはKSPのVLBIデータから地球回転パラメタを推定したり、全球気象数値データから地球回転パラメタの予測精度を改善させることなどが必要である。



第7図 1995年11月の地球回転パラメタ（極運動とUT1-UTC）の比較。
 1996年1月3日に発行されたIERS Bulletin Aの値を基準として、
 基準値との差をプロットした。

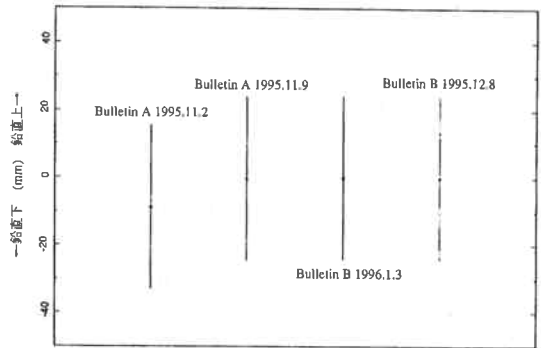


第8図 異なる IERS Bulletin の地球回転パラメタを使用したときの解析結果の比較。水平面内における小金井局の位置。原点は、1996年1月3日に発行された Bulletin B の値で解析した結果をとった。

4. まとめ

KSP の VLBI 実験のデータ解析を行うために開発したデータ解析ソフトウェア「武甕槌」について、その機能と実際に使用した結果について述べた。アンビギュエィティの修正や不良データの削除といった、これまでは解析者の判断による処理を要していた部分を自動化し、データベース作成から解析データの公開までを自動的に行うことに成功した。とくに、観測を行ってから1日以内に解析結果を公表できるというのは、ほかの高精度測地技術には見られない特徴であり、これによって地震予知に役立つデータの提供が現実的なものとなったと言えよう。

データ解析ソフトウェアの開発は今後も引き続いて行われる。まず、自動化をさらに一層進めるため、惑星歴のデータベースへの組み込みを行う jpl.exe などの改良を行う。また、不良データの除去処理では、マニュアル解析と差がないのが理想であり、そのためのアルゴリズムの改良を検討する。解析結果の精度向上のためには、全球気象数値データを利用した地球回転パラメタの予測法の改良、現在は取り入れられていない章動オフセットデータの解析への適用などを行うことなどが考えられる。また、現在は従来のシステムと同じ14チャンネルのデータだけが使用されているが、16チャンネルにした場



第9図 異なる IERS Bulletin の地球回転パラメタを使用したときの解析結果の比較。小金井局の位置の鉛直成分。原点は、1996年1月3日に発行された Bulletin B の値で解析した結果をとった。

合の観測周波数の最適化、電波源の選択も含めて 256 Mbps 観測時における最適な観測スケジュールの作成も行う。さらに、公開データ作成における課題としては、異常な変動があった場合にそのシグナルを検出するための解析データの処理法の研究、SLR (Satellite Laser Ranging) や GPS (Global Positioning System) などの他技術のデータといかに組み合わせるかといったことも今後の課題である。こういった将来に向けた課題をひとつひとつ解決しながら、よりすぐれたデータ解析ソフトウェアシステムの開発を行っていきいたいと考えている。

謝 辞

本システムの整備は、宇宙技術開発株式会社および株式会社 SCC の関係者の方々による協力により実現しました。また、自動解析の結果の比較に用いた従来システムによるデータ処理は、関戸研究官に協力していただきました。ここに深く謝意を表します。本ソフトウェアシステムでは、NASA / GSFC で開発された CALC, CATLG, DBH の各ソフトウェアを使用しています。使用を許諾していただいた Jim Ryan 氏をはじめ、関係者の方々へ感謝します。

参 考 文 献

- (1) T.A. Clark, B.E. Corey, J.L. Davis, G. Elgered, T.A. Herring, H.F. Hinteregger, C.A. Knight, J.I. Levine, G. Lundqvist, C. Ma, E.F. Nesman, R.B. Phillips, A.E. E. Rogers, B.O. Ronnang, J.W. Ryan, B.R. Schupler, D.B. Shaffer, I.I. Shapiro, N.R. Vandenberg, J.C. Webber, and A.R. Whitney, "Precision Geodesy Using the Mark-III Very-Long-Baseline Interferometer System", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **GE-23**, No.4, pp. 438-449, July 1985.
- (2) 木内等, 高橋幸雄, 近藤哲朗, 関戸衛, 中島潤一, 今江理人, 浜真一, "3.4.1 相関処理装置", 通信総研季, **42**, 1, pp.91-98, Mar.1996.
- (3) 関戸衛, 高橋幸雄, 近藤哲朗, 木内等, 小山泰弘, "3.4.2 一次処理ソフトウェア", 通信総研季, **42**, 1, pp.99-107, Mar.1996.
- (4) 近藤哲朗, 木内等, 小山泰弘, 関戸衛, "3.4.3 バンド幅合成ソフトウェア", 通信総研季 **42**, 1, pp. 109-119, Mar. 1996.
- (5) Seidelmann, P.K., "1980 IAU Nutation : The Final Report of the IAU Working Group on Nutation", Celest. Mech., **27**, pp. 79-106.
- (6) 近藤哲朗, 国森裕生, "III-5 バンド幅合成ソフトウェア", 電波季, **30**, 特1, pp.199-216, Nov.1984.
- (7) D.D. McCarthy (ed.), "IERS Standards (1992)", IERS Technical Note 13, July 1992.
- (8) International Earth Rotation Service, "IERS Annual Report for 1993", Observatoire de Paris, July 1994.
- (9) 中川徹, 小柳義夫, "最小二乗法による実験データ解析", 東京大学出版会.
- (10) 杉本裕二, 浜真一, "III-2 相関処理装置", 電波季, **30**, 特1, pp.163-175, Nov.1984.