

リアルタイム測地VLBI実験の成果

Achievements of real-time geodetic VLBI experiments

小山泰弘，近藤哲朗，関戸衛，市川隆一，吉野泰造，木内等，雨谷純，魚瀬尚郎，岩村相哲

Yasuhiro KOYAMA, Tetsuro KONDO, Mamoru SEKIDO, Ryuichi ICHIKAWA, Taizoh YOSHINO, Hitoshi KIUCHI, Jun AMAGAI, Hisao UOSE, and Sotetsu IWAMURA

あらまし 首都圏広域地殻変動観測システムでは，4ヶ所のVLBI観測局を高速ATM回線で接続し，観測データをリアルタイムに伝送することによって4局6基線のリアルタイムVLBI観測網を完成させた．これにより，観測データを即時に処理して観測結果を迅速に得ることが可能となり，観測から解析までの処理を完全に自動化することにも成功した．また，伊豆諸島周辺の地震火山活動に伴う局位置変化を克明に捉えることに成功するなど，世界に先駆けた成果をあげるのに大きな役割を果たした．

Abstract A geodetic real-time VLBI observation network with four observation sites in the metropolitan Tokyo area has been realized by using high speed ATM digital network under the Key Stone Project. As a consequence, entire VLBI operations starting from observations through data analysis have been fully automated and the time required to obtain final results has been minimized. Routine real-time geodetic VLBI experiments using the network have led outstanding achievements, such as the detection of the site position displacements due to the wide area deformation caused by the volcanic and seismic activities around Izu Islands.

1. まえがき

首都圏広域地殻変動観測計画(Key Stone Project, 以下KSP)では，4つのVLBI観測局の相対位置を高精度に，かつ高頻度に測定することを目的に，いくつかの点で従来のVLBI観測システムの枠を越えたシステム開発を行った(1)．高速ATM (Asynchronous Transfer Mode)ネットワークによって，4局6基線のリアルタイムVLBI観測を実現したのもその一つである．ほかにも，従来の測地VLBI観測より観測データレートを4倍以上にすることによって高感度化をはかったり，アンテナを重力変形の少ない小口径にして，かわりに駆動速度を高速にすることで単位時間あたりの観測数を増加させたりといった改良が図られている．また，観測から相関処理，さらにはデータ解析に至るまでの処理を完全に自動化し，従来のVLBI観測では実現できなかった高頻度での観測を実現した．このことは，同時に観測の信頼性を高め，観測データの品質を高めることにつながった(2)．本報告では，このKSPのVLBIシステムによって得られた成果のうち，特にリアルタイムVLBIによって可能となったものを中心に述べる．

2. VLBI観測および処理の自動化

KSPのVLBIシステムでは，VLBIでは初めて遠隔自動制御による無人観測を実現した．磁

気テープを用いた観測では、24巻のD1規格磁気テープで観測できるだけの時間(観測データレートが256Mbpsの場合で約1日)ごとにテープを入れ替えるという作業が必要であるが、磁気テープを用いないリアルタイムVLBI観測では完全に無人で何日でも観測を行うことが可能である。リアルタイムVLBI観測は、2.4Gbps (Giga bit per second)の速度を持つATMネットワークを用いて観測データを伝送するもので、通信総合研究所とNTT情報流通プラットフォーム研究所およびエヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社による共同研究によって実現した。従来の磁気テープにデータを記録する方式に比べて、データ処理に必要な時間を飛躍的に短縮することが可能となった。また、KSPで開発された観測システムは単に観測を自動化しただけではなく、ネットワークや制御システムを2重化することにより信頼性の向上を図り、トラブルが発生した場合にもすぐに原因がわかるように随所に工夫を施している。これまで5年間以上にわたって高頻度の観測を行うことで、システムの高い信頼性が実証されたと言える。

観測データの処理でも、相関処理からデータの解析、解析結果の公開までに至る一連の処理が自動化されている。各局で観測されたデータは、ATMデジタル回線を通じて小金井局に転送され、相関器でリアルタイムに相関処理される。1回の実験が終了すると、自動的にデータベースが作成され、解析処理が開始される。解析が終了すると、解析結果は気象庁に送られ、地殻変動を監視するためのデータとしてモニターされている。また、同様のデータが一般の研究者にもWWW (<http://ksp.crl.go.jp/>)やftp (<ftp://ksp.crl.go.jp/pub/jj144/>)によって提供されている。このように、最後の観測が終了してから30分以内にはデータが公開されており、ほとんど時間の遅れのない高精度な測位結果が利用可能となっている。

観測は、当初従来のVLBI観測と同じ56Mbpsのデータレートで毎日約5時間30分の観測でスタートしたが、1997年6月からは256Mbpsのデータレートでの観測を開始し、同年10月からは約24時間の観測を2日に1回実施するように移行した。256Mbpsというデータレートは現在定常的に行っているVLBI観測としては世界最高であり、24時間実験を2日に1回実施するという頻度の高さでも世界的に他に例を見ないものである。

3. 伊豆諸島周辺の地震火山活動にともなう広域地殻変動の検出

KSPでは、1995年1月以来毎日もしくは隔日の極めて高頻度な測地VLBI観測を行って、鹿嶋局の局位置を基準として小金井局、三浦局、館山局の3つのVLBI観測局の局位置を測定している。その結果、これら3つの観測局の位置は2000年6月まで一定の速度で変化している様子が明らかとなった。ここで得られた局位置変化は、北米プレートに対する太平洋プレートとフィリピン海プレートの運動の影響としてよく説明することができる。ところが、2000年6月末から7月はじめにかけて、館山局と三浦局の局位置がそれまでとは異なる変化を見せるようになった。図1に鹿嶋局と館山局の間の基線長変化を、図2に館山局の局位置の水平面内の変位を示す。これらの図で示されるように、館山局の局位置が急激に変化した様子が明瞭にとらえられている。この変化は7月から8月中旬にかけてがとくに顕著で、その後徐々に収束しているように見える。同様の局位置の変動は三浦局でも小さいながら測定されている。

つぎに、観測局位置の変化について、2000年6月以前の平常時の局速度と2000年6月15日から9月15日までの3ヶ月間の局位置変位とを図3および図4に示す。図4の2000年6月以降の局位置変位を示す図では、KSP観測局におけるGPS観測結果と、国土地理院の電子基準点におけるGPS観測結果の一部を示している。図4に示されているように、館山局と三浦局に見られる局位置の変化は、房総半島から三浦半島にかけて広範囲にわたる地殻変動の結果としてとらえられたものであることがわかる。同様に、伊豆諸島におけるGPS観測結果に

も急激な位置変化が観測されており、一連の広域地殻変動は、三宅島から神津島に向かって貫入した岩脈(ダイク)が周囲の地殻を押し広げたために起きたと説明することができる。地殻変動が始まったと推定される6月末は、三宅島での火山活動と、これに続く三宅島-神津島間での群発地震活動が活発化した時期と一致しており、広域にわたる地殻変動は伊豆諸島の地震火山活動によって引き起こされたものであると考えられる。三宅島の火山活動は、6月26日にマグマの上昇にともなう火山性地震が活発になり、その後の雄山山頂の陥没とカルデラ形成、高度8000メートル以上に達する噴煙柱を形成する数回の噴火、1日あたり数万トンもの火山ガス放出といった経過をたどって1年以上にわたり活動が継続している。三宅島での地殻変動や重力の観測結果から、雄山山頂の陥没は、いったん上昇したマグマが沈降しつつ三宅島西方海域に移動した結果引き起こされたと考えられる。さらにその後、三宅島西方から神津島周辺にかけて群発地震の震源域が時間の経過にしたがって移動したことから、三宅島地下のマグマが同海域の地下に貫入してダイクを形成し、その結果として広域の地殻変動が引き起こされたとして一連の現象を理解することができる。図5には、名古屋大学のグループによって提唱されているダイクと断層の組み合わせのモデルの一部のパラメータを変化させて得た地表における位置変動の分布を示す。

図4で示されるモデルは、館山局と三浦局でそれぞれ 5cm と 3cm の位置変動をよく説明することができる。群発地震の震源の領域から館山局と三浦局までの距離はそれぞれ約 100km と約 120km であり、地殻変動の影響がこれほど長距離に及んだという事実は、ダイクが地下深くにまで存在するか、あるいはダイクの幅が少なくとも 5m 以上に達していることを示しており、KSPによる観測結果は一連の現象をよりよく理解するために重要なデータを提供したと言える。

4. 地球回転パラメータの推定

KSPの観測網は最長の基線でも基線長が約135kmとVLBIの観測網としては短いですが、各局の局位置をグローバルな座標系で精度よく求めることができれば、その局位置を既知として地球自転軸の極運動とUT1-UTCの地球回転パラメータを推定することが可能である。KSPのVLBI観測局の位置は、これまで7回にわたって実施した鹿島34m局とのVLBI実験によって精度よく決定することができたので、この値を使用することによって実際に地球回転パラメータの推定が可能であることを示すと同時に、推定精度の評価を行った。

1998年の1月から6月にかけて実施した90回の24時間実験を用い、極運動(δx , δy)とUT1-UTCのアプリオリとしてそれぞれ0を与えてパラメータ推定を行った。ここで、極運動は地球の自転軸が北半球の地表と交わる北極点の変位で、 δx は経度0度方向、 δy は東経90度の方向への成分を示す。KSPの観測局の局位置は鹿島34m局との実験やこれまでのKSPでのVLBI実験を通じて求められたグローバルな座標系における位置と速度とを用いて固定し、地球回転パラメータ、大気遅延、クロックオフセットを推定パラメータとして最小2乗推定した。この結果をIERS (International Earth Rotation Service : 国際地球回転事業)の公表した確定値(EOP97C04)と比較した結果を図6に示す。推定値にはばらつきが見られるが、おおまかなトレンドは再現しているといえる。このことは、正確な観測局位置を用いることにより、KSPのVLBIシステムによる地球回転パラメータの推定が可能であることを示すものである。推定誤差は全実験の平均で10.0 mas (δx) 6.0 mas (δy) 0.59 msec (UT1-UTC)、最も小さい場合で4.8 mas (δx) 3.1 mas (δy) 0.29 msec (UT1-UTC)となった。ここで、masは1/1000秒角の角度を表す単位である。KSPのVLBIシステムでは、リアルタイムVLBIシステムによって観測と同時に相関処理を行い、観測終了後すぐに推定結果が得られるので、独自に地球回転パラメータの速報値を提供することが可能である。IERSが週に1回の頻度で発行した

Bulletin Aで公表した1996年1年間の地球回転パラメタの予測値と、その後公表された確定値との差を調べると、予測値の公表された当日で1.2 mas (δx) 1.3 mas (δy) 0.33 msec (UT1-UTC)の標準偏差をもつ分布が見られた。予測期間が長くなるほど誤差は増大するので、UT1-UTCに関してはKSPのVLBI観測データによってIERSの予測値を改善できる可能性がある。高速デジタル回線が長距離の基線に利用できるようなれば、さらに推定精度の向上も期待できるため、現在利用できる地球回転パラメタの速報値の精度を大幅に改善する可能性が技術的に示されたことになり、その意義は大きい。

5. 電波源強度変化の観測

KSPのVLBI観測の主目的は、それぞれの観測局の相対位置を正確に計測し、その変化をモニターすることであるが、同時に取得されるデータを利用すれば、観測対象の電波源のSバンド(2GHz帯)とXバンド(8GHz帯)におけるフラックス密度を推定することができる。とくに、1997年からは、リアルタイムVLBI観測システムを運用することにより、観測したデータをリアルタイムに相関器に伝送して処理できるようになったため、ほとんど時間の遅れなく電波源のフラックス密度を得ることができるようになった。

KSPでは、キューサーとBL-Lacに分類される合計16個のコンパクトな電波源を定常的に観測している。これらの電波源は、繰り返しささまざまな仰角で観測されるので、それぞれの観測で得られる相関強度から、大気的光学的厚さを推定し、同時に電波源のフラックス密度を推定することができる。ただし、この場合には、観測を行っている数時間の間、大気の状態が等方的でかつ定常的であることが必要であり、毎回の観測で精度の高い推定ができるとは限らない。そこで、過去に観測を行った約4年間のデータから、平均的な大気的光学的厚さを計算し、これをもとに各観測日における電波源フラックス密度を推定することで、十分な精度で推定値を得ることができると示された(3)。図7と図8は、このようにして得られた0059+581と1334-127のXバンドにおけるフラックス密度の変化の様子である。いずれも、静穏期に比べて3倍以上にまでフラックス密度が不規則に増加した様子が示されている。

観測に用いられている電波源のうちのいくつかは、電波源強度が急激に変化するBLAZARと呼ばれる天体に分類され、これらの天体の電波源強度をほぼリアルタイムにモニターすることは、フレア時の多波長観測を可能にするためにも意義が深い。

6. あとがき

KSPで整備されたVLBIシステムは、観測と解析の自動化によって、非常に高頻度の観測と迅速なデータ処理が技術的に可能なことを実践的に示したといえる。ここで得られたデータは、他の宇宙測地技術との比較を通じてそれぞれの誤差原因を調べたり、大気モデルの改良による精度向上を図る研究へとつながっている。また、リアルタイムVLBIシステムをさらに長い基線に適用することができれば、地球回転パラメタをリアルタイムに精度よく求めることが可能となり、人工衛星軌道の精度を改善するなどの波及効果が考えられる。このため、衛星回線や国際高速デジタル回線を利用したリアルタイムVLBI実験を将来実施することが望まれる。また、装置開発では、観測データレートをさらに4倍に高速化したギガビットVLBIシステムの開発を進めており、さらに高感度なシステムの開発を目指している。1999年には、国際的なVLBIの共同研究を推進することを目的として国際VLBI事業(IVS = International VLBI Service for Geodesy and Astrometry)が設立され、国際的なVLBI研究が組織だって推進される枠組みがスタートした。通信総合研究所は、IVSにおける技術開発センターなど5つのセンターとしての役割りを果たすことになり、今後もさらなる技術開発を行って国際的なVL

BI研究に寄与することが期待されている。

謝辞

KSPシステムの開発および運用は、通信総合研究所首都圏広域地殻変動観測計画推進本部メンバーをはじめ多数の関係者の方々により支えられました。また、リアルタイムVLBIシステムは、通信総合研究所とNTT情報流通プラットフォーム研究所およびエヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社との共同研究により開発されたものです。ここに合わせて深く感謝いたします。なお、一部のソフトウェアは、米国航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センターで開発されたものをもとに作成されました。また、図4には国土地理院の電子基準点におけるGPS連続観測の結果を、図5の位置変動分布のモデル計算には気象研究所で開発されたソフトウェアと名古屋大学のグループによって提唱されたモデルを使用しました。

参考文献

- (1) T. Yoshino: "Overview of the Key Stone Project", Special Issue of the J. Comm. Res. Lab., Vol.46, No.1, pp.3-6, 1999
- (2) T. Kondo, N. Kurihara, Y. Koyama, M. Sekido, and R. Ichikawa: "Evaluation of repeatability of baseline lengths in the VLBI network around the Tokyo metropolitan area", Geophys. Res. Lett., Vol.25, pp.1047-1050, 1998
- (3) Y. Koyama, T. Kondo, and N. Kurihara: "Microwave flux density variations of compact radio sources monitored by real-time very long baseline interferometry", Vol.36, No.2, pp.223-235, 2001

用語解説

VLBI Very Long Baseline Interferometry (超長基線電波干渉法)の略。複数のアンテナで同一の天体電波を受信し、その信号を合成処理することによってアンテナの相互位置を正確に測定したり、天体の高解像画像を得たりすることができる技術。

UT1 世界時 (Universal Time) のうち、天文観測から決定される時系に地球の極運動の補正を加えたもの。

UTC 協定世界時 (Coordinated Universal Time)。セシウム原子の固有振動をもとに定義される国際原子時に1秒単位のステップ調整を行って、UT1との差が0.9秒以内になるように管理されている時系。

フラックス密度 単位時間に単位面積を通過する単位周波数帯域幅あたりの電磁波エネルギー。天体電波源の強度を示す指標として用いられる。単位には、一般にジャンスキー (Jy) を用いる。

クェーサー 大きな赤方偏移と鋭い吸収線スペクトルを示し、電波、赤外線、X線で巨大なエネルギーの放出が観測される天体。

BL-Lac 急激な光度変動が観測されるコンパクトな活動銀河。

図の表題

図1 KSPのVLBI観測によって得られた鹿嶋局と館山局の間の基線長. 灰色の直線は, 2000年6月以前の基線長変化の直線近似を示している.

図2 KSPのVLBI観測によって得られた館山局の局位置の水平面変位. 上半分に東西成分を, 下半分に南北成分の変位を示している. 灰色の直線は, 2000年6月以前のデータに対する直線近似を示す.

図3 2000年6月以前のKSPのVLBI観測データから得られた, 平常時の局位置の変位速度ベクトル.

図4 2000年6月20日から8月20日までの2ヶ月間のデータを使用して求めた各局の変位ベクトル. KSPのVLBI観測結果に加えて, KSPのGPS観測結果と国土地理院の電子基準点におけるGPS観測結果の一部を示している. また, 三宅島と神津島との間の海底に想定されるダイクのおおよその位置も図示した.

図5 横ずれ断層とダイクの組み合わせモデルによって計算された, 地表面における位置変動分布. ダイクは上面までの深さが3kmで, 水平方向に20km, 鉛直方向に12kmにわたって5mの厚さをもつと仮定した. また, 断層面は上面までの深さが3kmで, 水平方向に10km, 鉛直方向に5.9kmにわたって4mのずれを伴っていると仮定した. ダイクと断層の位置およびパラメータは名古屋大学のグループによって提唱されたモデルをもとにした. また, 地表の位置変動の分布は, 気象研究所によって開発されたソフトウェア(MICAP-G)によって計算した.

図6 KSP-VLBI網の実験により推定した極運動(δx ・ δy)とUT1-UTC. 横軸は1998年1月1日を1とした通算日. IERSの確定値(EOP97C04)を実線で示し, 推定された値を黒い丸で, 1σ の推定誤差を鉛直の実線で示している.

図7 電波源0059+581のXバンドにおけるフラックス密度の変化.

図8 電波源1334-127のXバンドにおけるフラックス密度の変化.

Figure 1

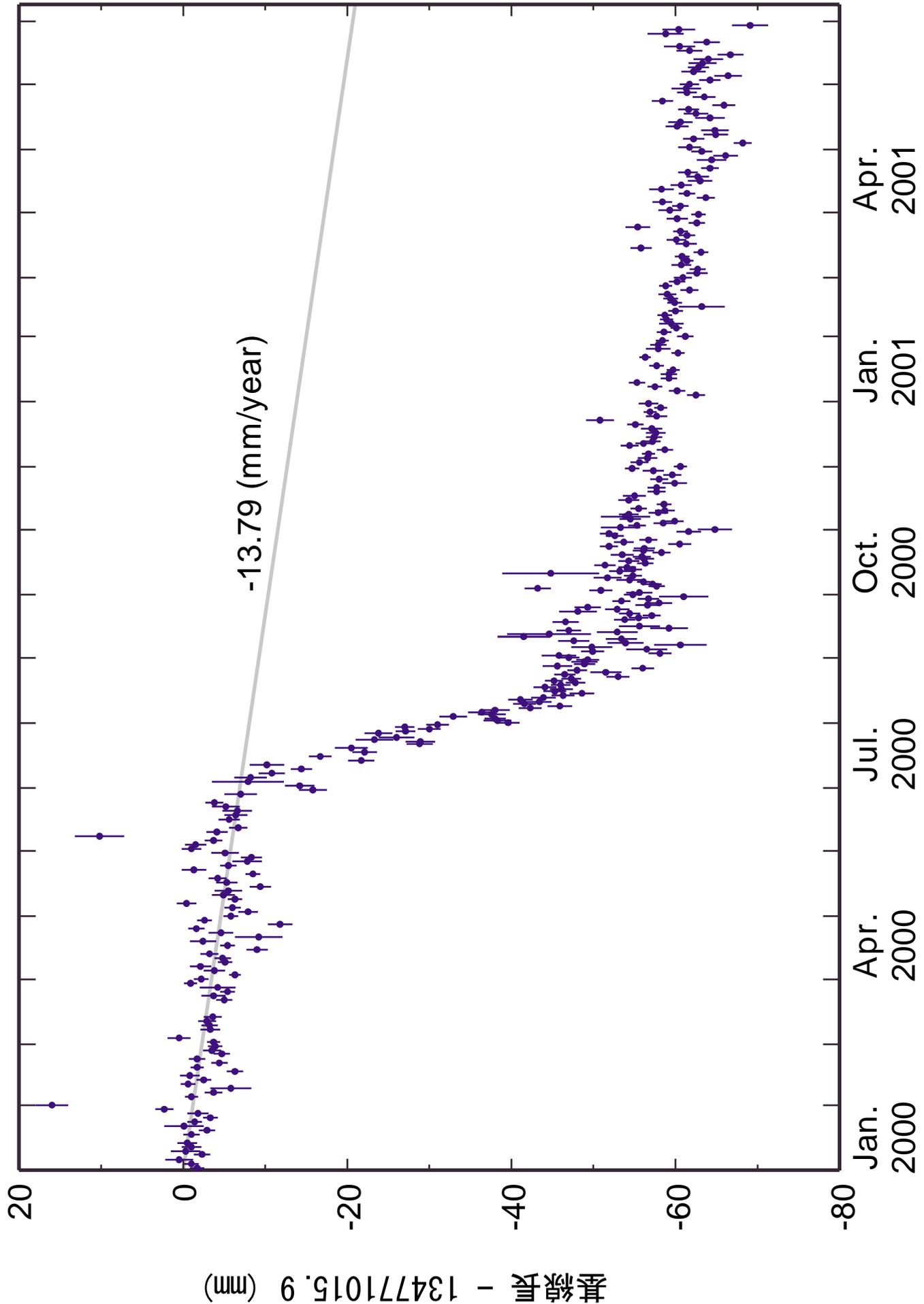


Figure 2

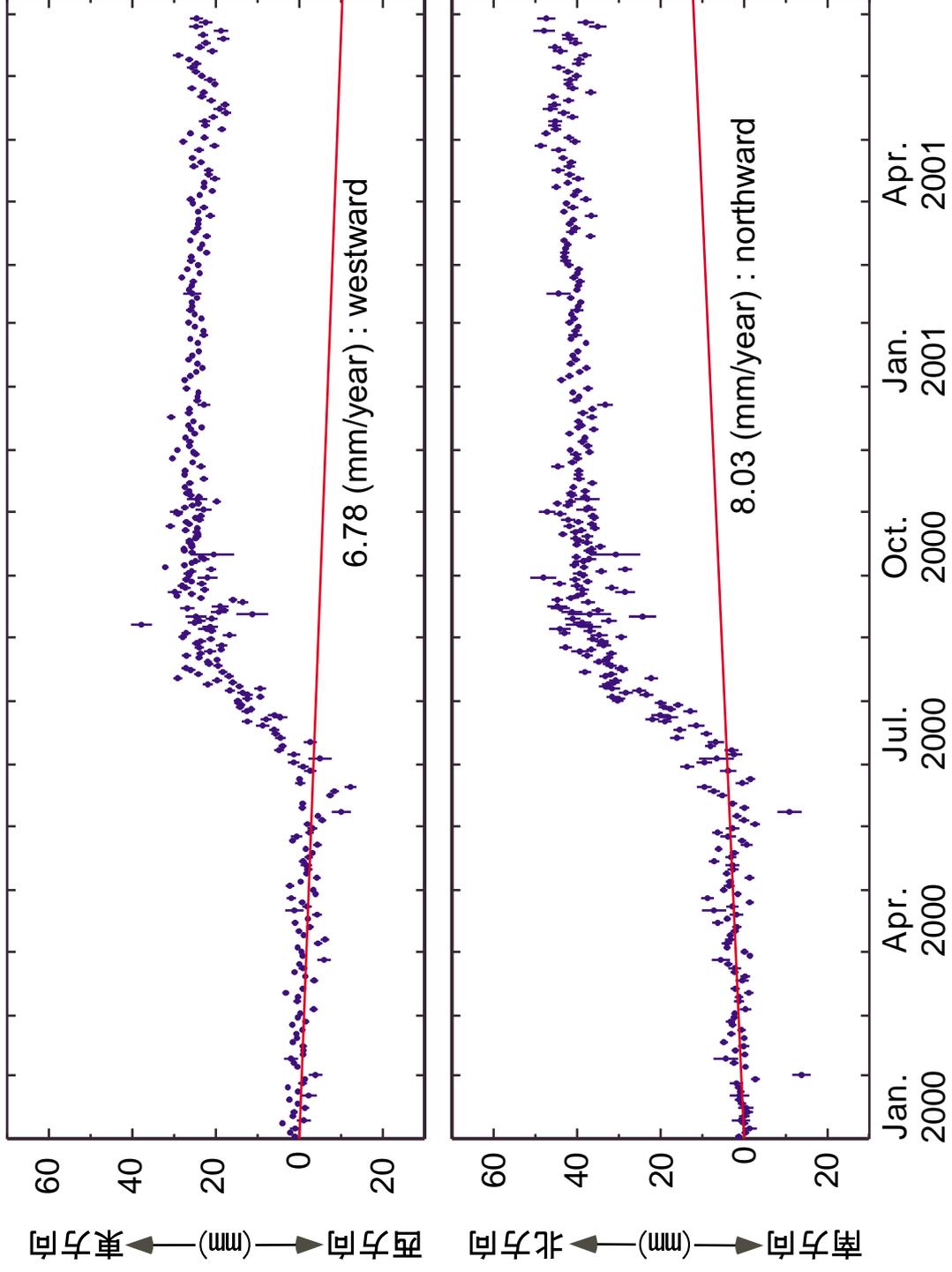


Figure 3

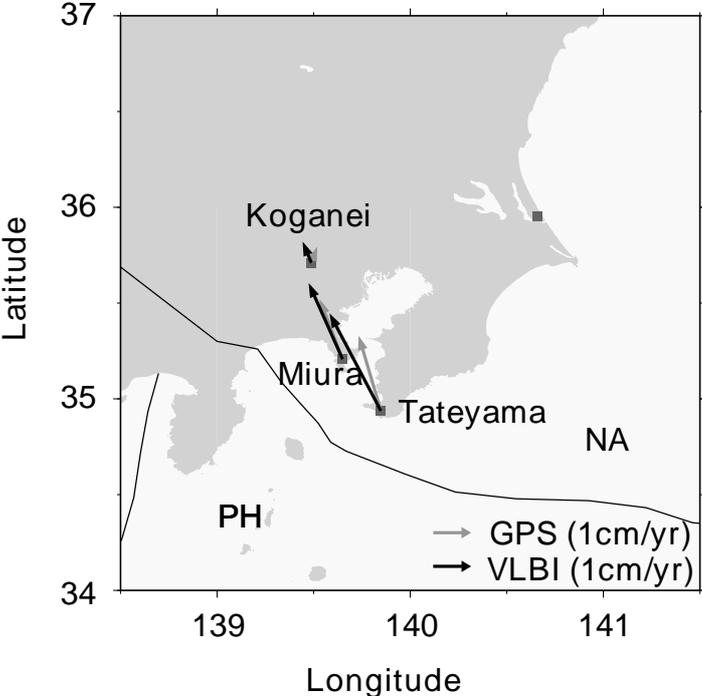


Figure 4

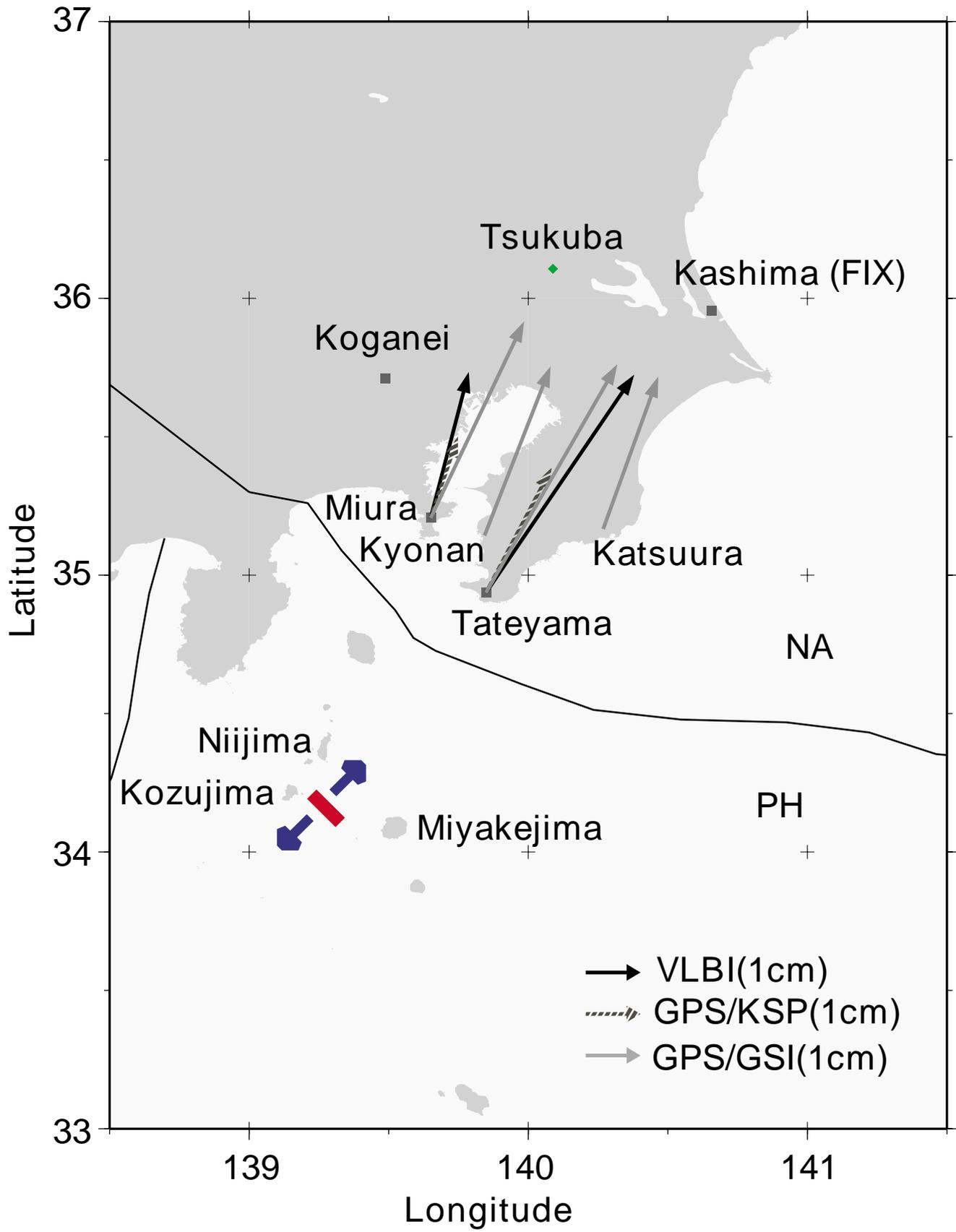


Figure 5

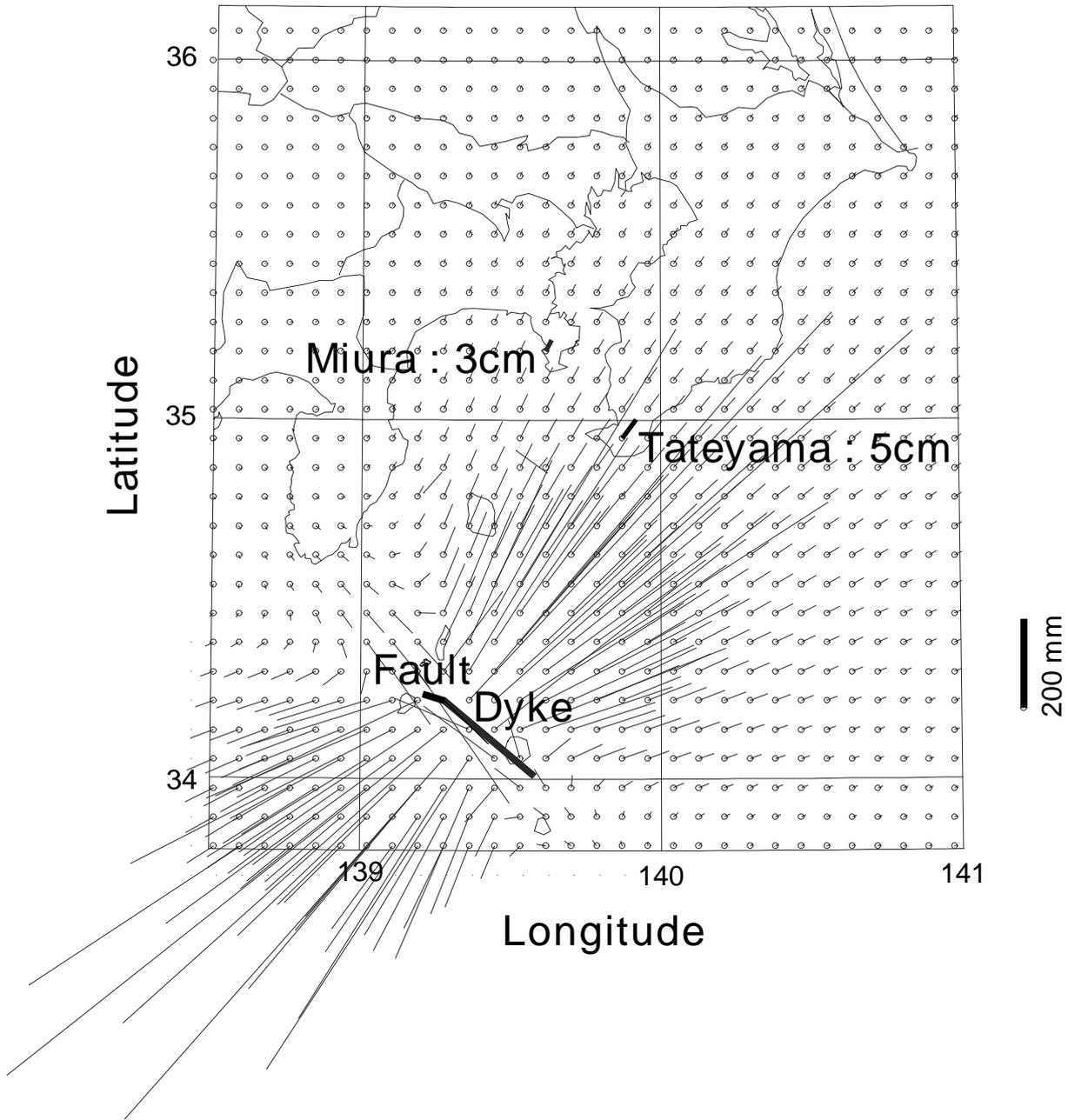


Figure 6

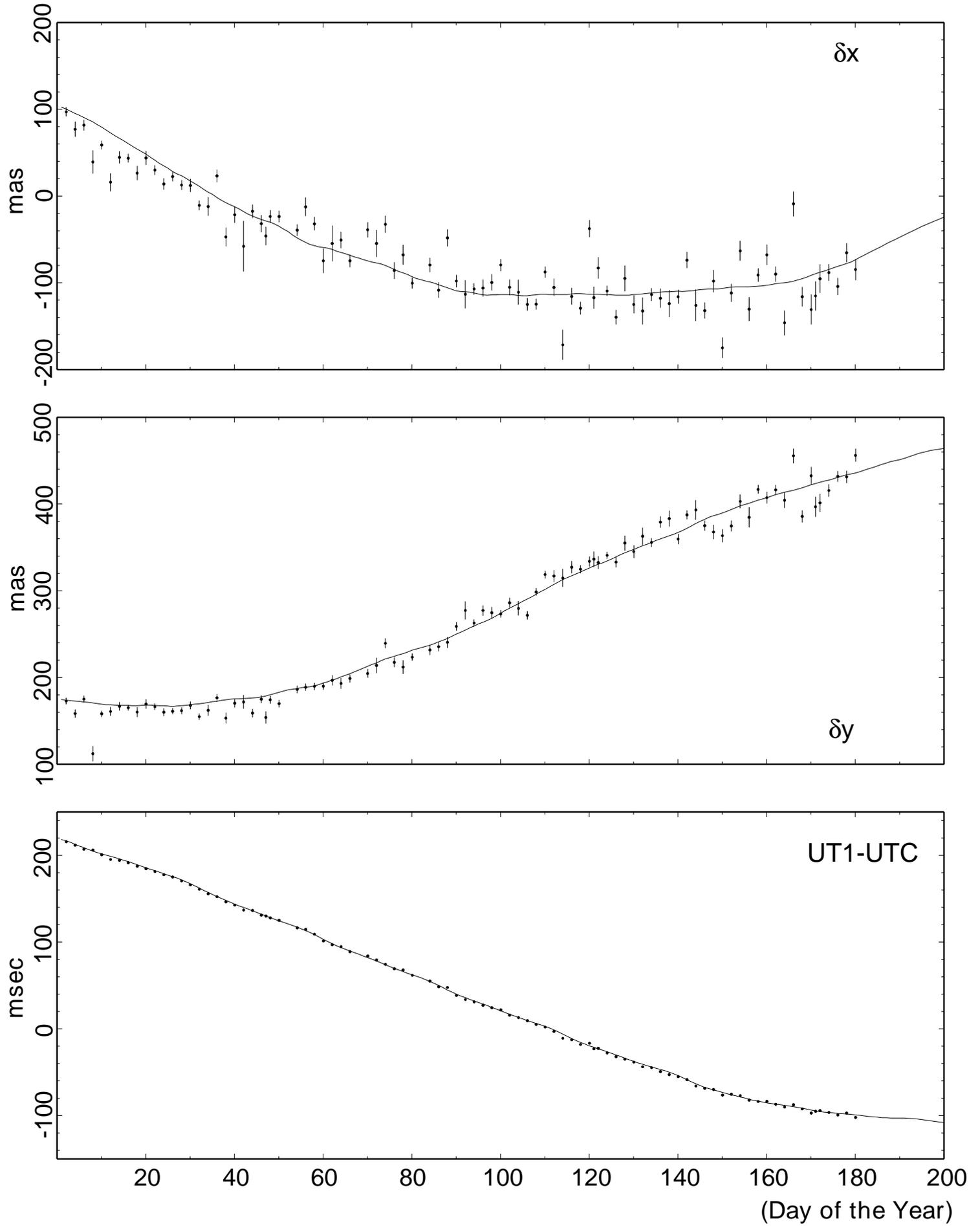


Figure 7

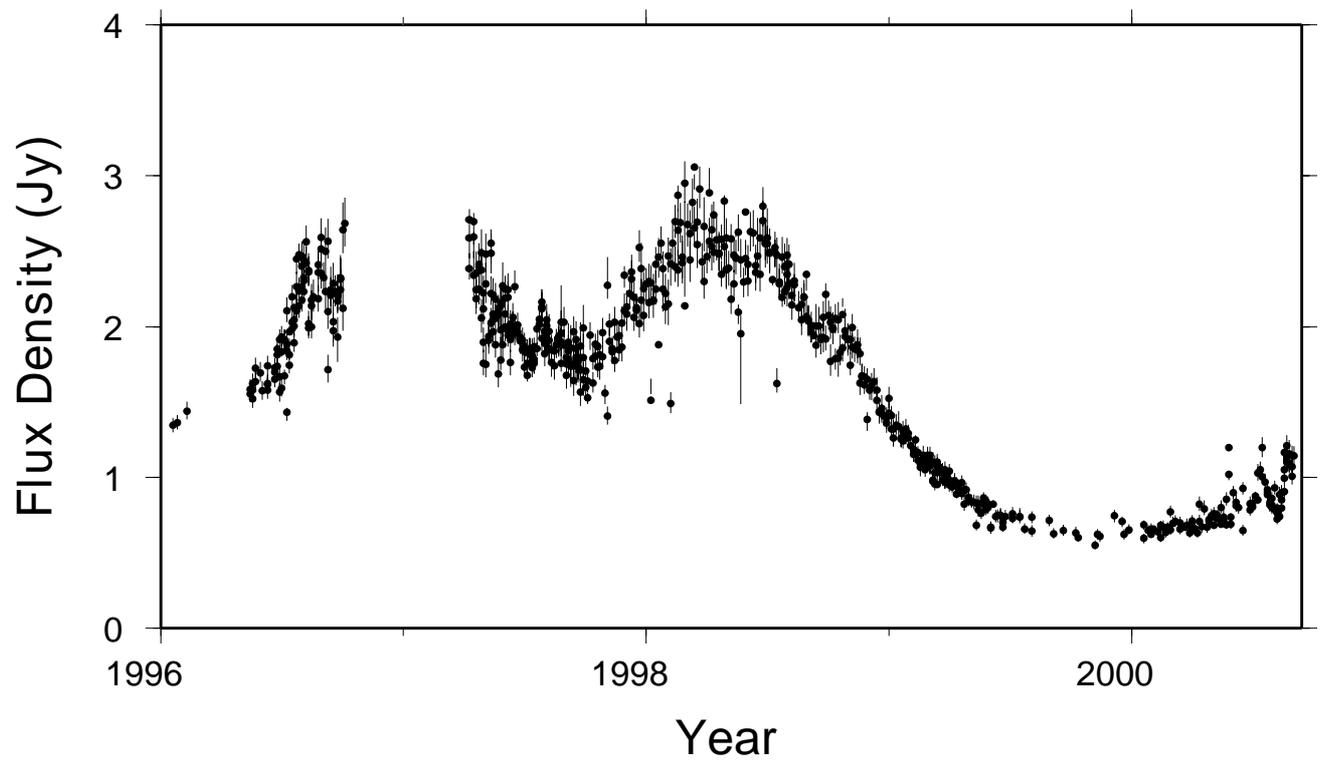


Figure 8

