



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	高速サンプリングGPS観測のノイズ評価
Author(s)	金曾, 貴之; 小山, 順二; 森谷, 武男 他
Citation	地震. 2輯, 53(3), 221-229 https://doi.org/10.4294/zisin1948.53.3_221
Issue Date	2001-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/57965
Type	journal article
File Information	Zisin_53_221-.pdf



高速サンプリング GPS 観測のノイズ評価

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻* 金 曾 貴 之・小 山 順 二・森 谷 武 男

北海道大学大学院地震火山研究観測センター** 高 橋 浩 晃

Noise Evaluation of High-speed Sampling GPS Observation

Takayuki KANESO, Junji KOYAMA, Takeo MORIYA

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science,
Hokkaido University, Kita 10 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

and

Hiroaki TAKAHASHI

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science,
Hokkaido University

(Received August 21, 2000; Accepted October 31, 2000)

We seek the way of high-speed sampling GPS observation as a broad-band displacement-seismometer. For this purpose it is necessary to evaluate the noise level inherent to the GPS observation due to ionospheric and tropospheric effects, multi-path and satellite configuration. In this study, we develop a stand-alone data acquisition system for the continuous high-speed sampling GPS observation after overcoming the troubles in automatic handling the large volume of GPS data. Four GPS stations are established in Hokkaido area and the period of each observation is half year to year and half. Telemetry of the GPS data using the public telephone line is tested and completed. GPS station coordinates are calculated every second by the GPS kinematic method. Noise reduction for each noise source has been made, and noise levels of horizontal and vertical components after the reduction are about ± 4 mm, ± 7 mm, respectively in the case of 150 km baseline length. Noise levels of various baseline lengths are also evaluated in different period ranges. These estimates of noises prove that the earthquake larger than JMA magnitude 5.9 can be detected at a GPS station 60 km away from the epicenter.

Key words: GPS measurement, GPS noise level, Noise reduction.

§ 1. はじめに

GPS (Global Positioning System) は地球周囲の高度約 20000 km を周回する人工衛星から発せられる電波を受信することにより、受信点の位置を算出する測位システムである。GPS 観測による測位は、高精度の測地測量や地殻変動観測ばかりではなく、最近では船舶、航空機、自動車の航行計測の民生利用や気象観測にも利用されるようになってきた。日本でも国土地理院が GEO-NET (GPS Earth Observation NETwork) と呼ばれる非常に高密度な GPS 連続観測システムを全国に構築

し、日本国内の地殻変動を連続観測している [宮崎・畑中 (1998)]。また、この GPS 連続観測点は電子基準点として、一般の測量の基準点にも使用されるようになってきた。

このような高密度 GPS 連続観測により、さまざまな地球物理学的现象が新たに確認できるようになってきた。1994 年 10 月 4 日に北海道東方沖地震が発生し、GPS 連続観測システムはこの地震に伴う地殻変動を検出した [TSUJI *et al.* (1995)]。また、1994 年 12 月 28 日に発生した三陸はるか沖地震ではコサイスマックな変動

*〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目

**〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目

の後にポストサイスミックな変動が約1年間にわたって継続し、地震後の緩やかな地殻変動によって放たれた地震モーメントは地震時に放たれたものよりも大きいという結果が得られた [HEKI *et al.* (1997)]. さらに日本全国約1000点という高密度なGPS観測網は気象観測AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) にも匹敵し、GPSを用いた降水予報技術の研究も行われている [万納寺・多田 (1997)].

GPS観測ではデータ取得のサンプリング間隔を自由に変えることができ、10~20 Hzの短周期の計測も可能である。従来の地震計のように振り子による地動計測ではないので変位量の制限はなく、長周期側での特性は無限に伸びている。したがって、GPS観測は他の変動観測機器にはない超広帯域の地殻変動・地震動観測が原理的には可能である。HIRAHARA *et al.* (1996) は、1995年兵庫県南部地震発生直後から多点のGPS臨時観測を実施し、地震後の余効的地殻変動をとらえた。彼らはまた1秒サンプリングのGPS観測も行ったが、観測ノイズ (0.5~3 cm) を超える地殻変動は見いだせなかった。1996年12月3日に発生した日向灘沖地震において、宮崎・他 (1998) は国土地理院が取得した1秒サンプリングGPSデータを解析し、理論地震波形 [菊地 (1996)] と比較している。このような高速のGPS測位解析はkinematic解析と呼ばれ、観測点座標値のゆっくりした変化を計算するstatic解析とは、推定するパラメータや解析手順が少し異なる [土屋・辻 (1999)]. また、吉田・他 (1999) は起震車の上にGPS受信機と加速度地震計を設置して、起震車を振動させたときの変位記録を比較し、GPS観測の短周期帯での感度を調べている。このように、最近になって、サンプリング間隔を短くしてGPSデータを取得し、kinematic解析を行って地震時の変動をとらえようとする研究が行われ始めている。しかし、これまでこのタイムスケールにおいてGPS観測に固有な誤差の評価はほとんど行われてこなかったため、どの程度の変動を検出することができるのか不明であった。宇宙技術を利用したGPS計測にはそれ固有のノイズ源があり、ノイズの周波数特性や振幅特性を知ることが今後高速GPS観測を進展させるために必要である。また、もともとGPS観測のデータ量は多いため、サンプリング間隔を短くすればデータ量が増大し、観測システムに大きな負荷がかかり、システムが不安定になりやすい。地震時の地殻変動を検出するためには、より安定した観測システムを整え、地震が発生した場合にはGPSデータを瞬時に取得できるシステムを構築する必要がある。しかし、この分野での簡便なGPS計測の汎用化の拡張は未だなされていないのが現状である。

本研究では高速サンプリングGPS観測システムを構築することから始める。システム構築に際しさまざまなトラブルが発生した。そのなかには通常の30秒サンプリングGPS観測では発生しないトラブルもある。このトラブルにどのように対処したかについて述べる。次に高速サンプリングGPS観測から得られたデータの解析結果について示す。GPSデータにはさまざまなノイズがあり、それらを除去することで真の変動を求めることができる。ノイズの性質、除去方法、解析法、解析結果と誤差について示し、GPS計測の地震観測への応用の可能性について議論する。

8.2. 高速サンプリングGPS観測システム

2.1 高速サンプリングGPS観測システムの概要

本研究ではまずスタンドアローン型で高速サンプリングGPS観測ができ、地震が起こったときに、あるいは必要なときに、GPS観測データを電話回線で取得できるような簡便なシステムを構築する。

本研究で用いる受信機はTOPCON GP-R1DY (ASHTECH Z-XII3のOEM製品)、アンテナはASHTech 700718である。TOPCON GP-R1DYには6 Mbyteのメモリが装着されてある。GPSの1観測データ (1エポック) はおおよそ300バイトの容量であるので、サンプリング間隔が1秒の場合、1日約26 Mbytesのデータ量となる。したがって、連続観測データを取得するためには、受信機のメモリを使い切らないうちにデータを別の媒体に転送する必要がある。研究を開始した当初、1日を3時間ごと8つのセッションに分け、受信機からパソコンへ直接データ転送を行った。転送時のボーレートは38400 bpsに設定した。この場合、実際に1セッション分のGPSデータを転送するのに要する時間は約50分である。また、GPSデータを保存するため、4 Gbyteの外付けハードディスクをパソコンにSCSI接続した。4 Gbyteの外付けハードディスク1台で約4カ月間分のデータを保存することができる。この場合、観測点に同じタイプのハードディスクを交換しにいくだけでよく、また交換中もデータが欠測することがない。

観測点では停電や、落雷により観測が停止する可能性がある。実際に停電により2時間以上データが欠測になった観測点もあった。受信機と外付けハードディスクは停電復旧後自動的に立ちあがる。しかし、パソコンは内蔵バッテリーから立ちあがることを前提としているため、長時間の停電ではバッテリーを消費しきり、AC電源が復旧しても自動的に立ちあがらないこともあるので工夫が必要である。

TOPCON GP-R1DYには受信機対応の測地用ソフト

ウェア GPS 5.0 があり、GPS 観測データの後処理ができる。DOS レベルで作動するので、DOS バッチファイルにオプションをつけたコマンドを書き、自動でプログ

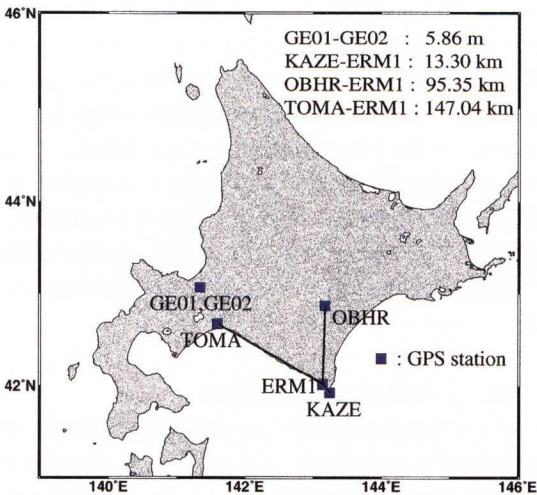


Fig. 1. Location of high-speed GPS observation sites in Hokkaido, Japan. GE01 and GE02 are temporary test sites at Hokkaido University, Sapporo. ERM1 (Erimo) was installed on June 22, 1999 and KAZE (Kaze-noyakata) on September 30, 1999. TOMA (Tomakomai) was started on September 9, 1999 and OBHR (Obihiro) on October 5, 1999.

ラムを起動することも可能である。我々は GPS データを受信機のメモリからハードディスクに転送するために「remote」というプログラムを用いている [TOPCON (1993)]. 受信機が新たなセッションに入るとそれまでの観測データファイルは「remote」を自動的に起動することでハードディスクに転送される。このとき、転送開始時刻はセッションの時間区分と転送に必要な時間を考えて、あらかじめ設定しておく。バッチファイル中での時刻の認識、ループ変更にはバッチユーティリティーのフ

High-speed Sampling GPS Observation System

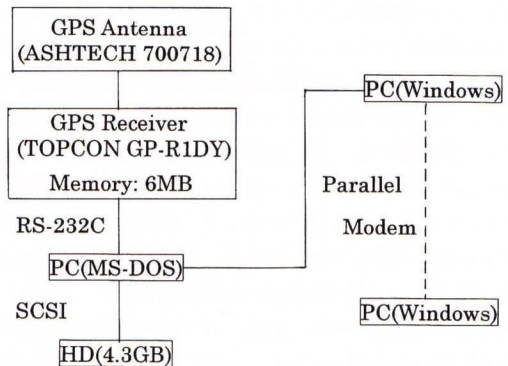


Fig. 2. Block diagram of high-speed GPS observation using personal computers with telephone-line telemetry.

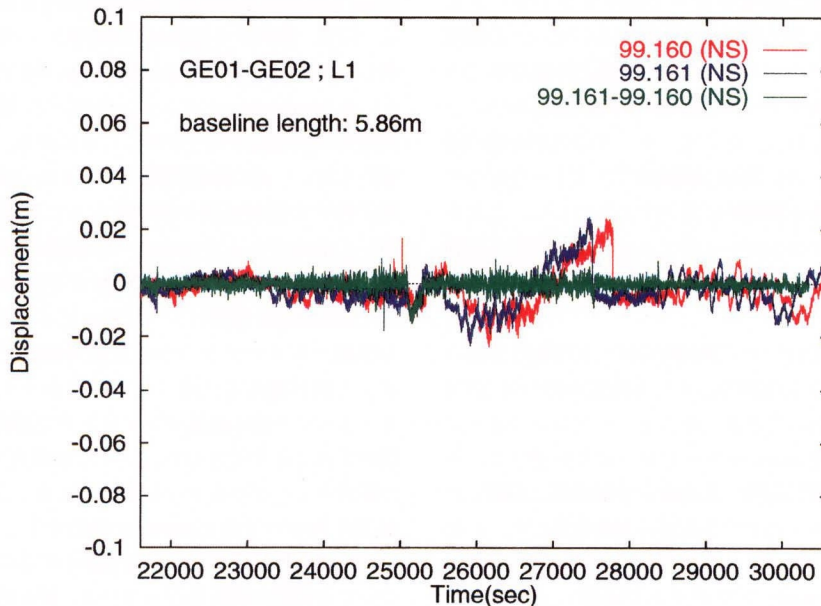


Fig. 3. Variation of NS coordinate of GE02 respect to that of GE01 on Julian day 160 (red) and 161 (blue), 1999. Green trace is the difference between 160 and 161 with the time delay in the text. Only L1 component was analyzed in this case.

リーソフト BU (Ver. 1.10) を用いている。

2.2 トラブルと対処法

§ 2.1 で述べたシステムを用いて、北海道大学理学部 3 号館屋上、えりも港えりも検潮所、えりも町風の館、帯広畜産大学、北海道大学農学部付属苫小牧演習林で高速サンプリング GPS 観測を開始した。観測点配置を Fig. 1 に示す。GPS アンテナは建物屋上に打ち込んだアンカーボルトに、屋上防水シートで覆われている場合はアンカーボルトを打ち込んだコンクリートブロックを屋上に接着し、固定した。受信機、パソコン、ハードディスクは建物屋内に設置した。当初、パソコンが「remote」起動中にハングアップして頻繁に欠測した。この原因の一つとしてボーレートが高すぎて受信機とパソコンとの通信時に同期が取れないということがあげられる。これは転送ボーレートを 19200 bps に下げることによって一部解決した。それに伴い、受信機のセッション数を 8 から 10 に増やした。ボーレートを下げたが同時にセッション数を増やしたので、データ転送に要する総時間はわずかの増加で抑えられる。実際には 2 時間 24 分の GPS データは約 3 Mbyte の大きさであり、転送に 1 時間 10 分ほどかかる。また、はじめパソコンの OS は Windows 95 を使っていた。しかし、Windows 95 は長期間連続稼動したままにしておくでスワップファイルが大きくなり、ついにはハングアップしてしまう。これはパソコンの OS を MS-DOS 6.2 に変更することで対処した。しかし、上記の変更を行ってもパソコンがハングアップしてデータが欠測する観測点もあった。この原因として、個々のパソコンと GPS 受信機との通信系での相性が合わず、時々データ転送時に同期が取れないことがあることが考えられる。そこで、データの欠測を最小限に抑えるために、AC 電源に機械的なタイマーを取り付け、1 日 1 回電源を強制的に落とすようにした。これを行うことで、パソコンがハングアップした状態でも自動的に再起動して初期状態に戻り、観測・データ転送を開始する。

次に電話回線を用いた GPS 観測データの転送を試みた。えりも港えりも検潮所とえりも町風の館には NTT 公衆電話回線を引いてある。そこで、パソコンにインストールされている pcmcia カードサービスを用いて、モデムを接続し、電話回線で北海道大学理学部に設置した公衆回線+パソコンにデータを送る方法を考えた。しかし、MS-DOS はマルチタスク機能を持っていないので、GPS 受信機と remote プログラムで通信しているパソコンに割り込みをかけ、電話回線でデータを転送することはできない。そのため、受信機に接続されている MS-DOS パソコンにもう 1 台の Windows パソコンを

パラレル接続し、セッション終了後受信機に接続した MS-DOS パソコンから Windows パソコンに観測データを転送することにした。パラレル通信には MS-DOS レベルで作動する STR プログラムを用いる。Windows はマルチタスク機能があり、ダイヤルアップサーバーの設定が容易である。ハードウェアの接続状況を Fig. 2 に示す。モデムの接続スピードは電話回線の使用状況にもよるが、アナログ回線では約 30000 bps で接続して、1 セッション 2 時間 24 分の GPS 観測データを転送するのに約 20 分を要する。1999 年 12 月にえりも検潮所、風の館にそれぞれハードウェアを設置し、札幌から現地で取得した GPS 観測データの確認・転送を可能にした。

§ 3. ノイズ源の特性と誤差評価

ここでは独自の観測を行った北海道大学理学部 3 号館屋上、えりも港検潮所、えりも町風の館、苫小牧地方演習林、帯広畜産大学の観測から、いろいろな基線長での GPS 観測データを比較することができる。ここでは観測データの kinematic 解析から、その結果と座標値に含まれる誤差について評価する。

全ての解析で使用したソフトウェアは Bernese GPS Software Ver.4.0 [ROTHACHER and MERVART (1996)], 衛星の軌道情報は IGS (International GPS Service for Geodynamics) 精密暦、地球回転パラメータは IERS (International Earth Rotation Service) Bulletin-B である。以下、解析する基線は(固定点)-(移動点)の組で表し、Bernese GPS Software Ver. 4.0 でサポートされている kinematic オプションを用いて、固定点に対する移動点の座標時系列を求めることにする。普通の static 解析では、一連の観測期間のデータから搬送波の波数不確定性や大気遅延量を座標値とともに推定するのであるが、このオプションは求まった波数不確定性を固定して、1 エポックごとに座標値だけを計算するものである。kinematic 解析はすべてのエポックにおいてすべての座標パラメータを一つの正規方程式で解くため、エポック数が増えるに従って方程式のサイズが大きくなる。よって一度に高速サンプリングで長時間のデータを解析することができない。そこで本研究では 10 分ごとに解析ウィンドウをずらしながら 1 セッション (2 時間 24 分) のデータを kinematic 解析することにする。

以下の解析結果は NS 成分を図示するが、EW 成分についても同様の解析を行っている。EW 成分のノイズレベルは NS 成分の 50% 程度である。これは我々の観測点緯度で観測される衛星配置によるものと考えられる。ノイズ除去した EW 成分の変動幅は以下に述べる NS

成分のそれと同程度か少し小さい。上下動成分のノイズレベルは一般に水平成分の3~5倍大きい [HIRAHARA *et al.* (1996), 土屋・辻 (1999)]. 上下動成分のノイズ除去については別の解析工夫が必要である。

3.1 理学部3号館屋上での観測データとノイズ源

高速サンプリング GPS 観測を実施するにあたり、北海道大学理学部3号館屋上に GPS アンテナを2台並べて設置し、ハードウェアの移動試験・解析手順の確認を行っている。二つのアンテナの基線距離は5.86 mであり、対流圏伝播遅延、電離層伝播遅延はこれらの観測点で共通であると考えられるので1周波 (L1 帯: 周波数1,575.42 MHzの搬送波) で解析を行った。Fig. 3に解析結果を示す。横軸は1999年6月9日0時0分、1999年6月10日0時0分からの経過時間 (s)、縦軸はstatic解析で得られた移動点座標値からの変化量 (m) を表し、6月9日の座標時系列を赤の実線、6月10日の座標時系列を青の実線で、各成分ごとに示している。

解析期間全体において、6月10日の座標時系列には周期200秒振幅1 cm程度のノイズ、また、周期2000秒振幅0.5 cm程度のノイズが見られる。これは基線距離が数mしか離れていない観測であるから、各観測点に固有なマルチパスが原因であると考えられる。また、28000秒付近に振幅2 cmのパルス状ノイズが発生している。Fig. 4に観測点間で同時に受信している衛星の個数を示す。28000秒付近のパルス状ノイズは受信している衛星の個数が減少しているときに生じている。したがって、これは受信している衛星の切り換わりによるものであると考えられる。これらのノイズを除去するため

にそれぞれ前日のデータを解析した。6月10日の時系列に現れるノイズは前日の9日にもほとんど同じ振幅で繰り返している。マルチパスはGPS衛星の配置に依存し、GPS衛星の配置は23時間56分4秒後に同一となるから、翌日もしくは前日の観測点座標値と現在の座標値の差を取ることでこれらのノイズを除去できる [HEKI and TAMURA (1997)]. この際、GPS時とUTC (協定世界時) との差 (うるう秒) の変化にも注意しなければならない。また、現在の観測点の変動をリアルタイムに求めるためには翌日のデータを用いるのではなく、前日のデータを用いて現在との差を取ればよい。

本研究では現在の座標値と前日の座標値を別々に kinematic 法で求めて、前日のデータを243秒前にずらして差を取ることにする。6月10日の時系列と6月9日の時系列の差を緑の実線で示す。前日との差を取った時系列は周期的なノイズを効果的に除去しており、残ったノイズは振幅1 cm以下の定常的ノイズである。解析で得られた時系列が平均値に対してどの程度のばらつきをもっているか、分散と平均絶対偏差で調べることができる。平均絶対偏差 D は平均値からのばらつきの平均であり、以下のように定義される。

$$D = \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}| / N$$

Table 1に各時系列の分散、平均絶対偏差をそれぞれ示す。前日との差を取ることで時系列の分散は1/10、平均絶対偏差は1/3となり、ノイズを効果的に除去していることがわかる。

しかし、この時系列には前日との差を取っても除去で

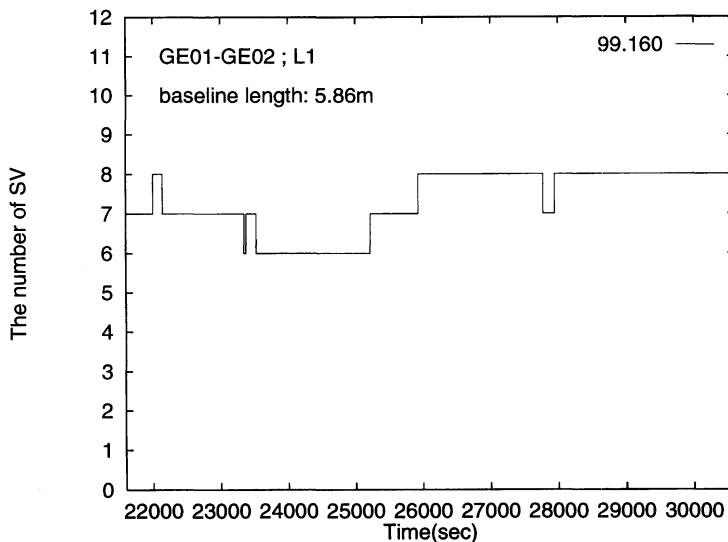


Fig. 4. Variation of number of space vehicles in sight on Julian day 160, 1999 at GE01/GE02.

Table 1. Variance and averaged absolute residual of coordinates of GE02 with respect those of GE02 at Hokkaido University, Sapporo, Japan on Julian day 160 and 161, 1999.

Julian day	Component	Variance (cm ²)	Averaged absolute residual (cm)
160	NS	0.416	0.462
	EW	0.196	0.320
	UD	1.106	0.840
161	NS	0.407	0.464
	EW	0.196	0.321
	UD	1.126	0.842
161-161	NS	0.048	0.153
	EW	0.026	0.118
	UD	0.269	0.346

Table 2. Variance and averaged absolute residual of coordinates of OBHR (Obihiro) with respect to those of ERM1 (Erimo) on Julian day 321 and 322, 1999.

Julian day	Component	Variance (cm ²)	Averaged absolute residual (cm)
321	NS	2.209	1.241
	EW	1.128	0.831
	UD	3.423	1.474
322	NS	2.353	1.272
	EW	1.255	0.897
	UD	5.256	1.844
322-321	NS	0.522	0.565
	EW	0.403	0.513
	UD	2.932	1.378

きないノイズが残っている。25200 秒付近には受信している衛星の切り換わりその瞬間、計算が不安定になったことが原因と思われる振幅 1.5 cm のパルス状ノイズ、また 24900 秒付近に原因は不明であるが振幅 2 cm のインパルス状ノイズがそれぞれ発生している。これらのノイズは周期的に繰り返さないで前日との差を取っても除去できていない。28000 秒付近のパルス状ノイズは受信している衛星の個数が減少しているためと考えられ、このノイズは前日との差を取って除去することができた。しかし、25200 秒付近のパルス状ノイズは見えている衛星の個数が増加しているにもかかわらず、前日との差を取っても除去できない。衛星の増加、減少にかかわらず、衛星の切り換わりの際には前日の差を取っても完全に除去できないパルス状のノイズがあることが本研究で明らかになった。これらは受信状況の観測ログから、観測データに不連続が生じないように解析ウインド

ウを調節するなどして逐一取り除かなければならない。

3.2 帯広-えりも港検潮所の解析結果

帯広畜産大学 (OBHR) とえりも港検潮所 (ERM1) の基線長は 95.3 km である。長基線では各観測点で GPS 衛星から発せられた電波の経路が異なるので、電離層遅延を無視できない。よって解析には 2 周波 (L1, L2) を用い電離層遅延を補正する。大気遅延は最初に観測点の座標を求める static 解析では推定するが、kinematic 解析では標準大気を仮定し座標値のみ計算した。Fig. 5 に kinematic 解析の結果を示す。横軸は 1999 年 11 月 17 日 0 時 0 分、18 日 0 時 0 分からの経過時刻 (s)、縦軸は static 解析から得られた移動点座標値からの変化量 (m) である。赤の実線が 11 月 17 日の座標変化、青の実線が 11 月 18 日の座標変化、緑の実線が 11 月 18 日と 11 月 17 日の差をそれぞれ示している。§ 3.1 と同様に、11 月 17 日の座標時系列には周期 200 秒振幅 2 cm、また周期

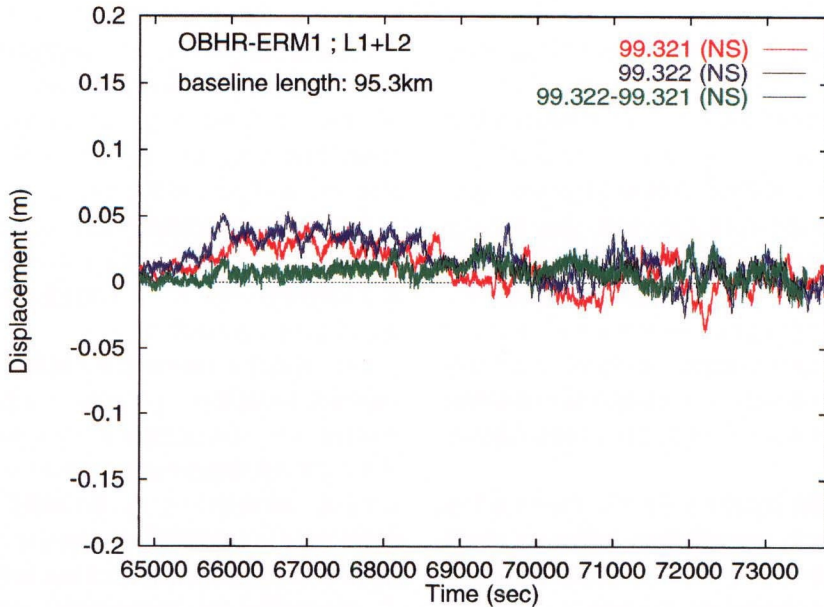


Fig. 5. Variation of NS coordinate of OBHR respect to that of ERM1 on Julian day 321 (red) and 322 (blue), 1999. Green indicates the difference as in Fig. 3. L1 and L2 components were analyzed to evaluated the coordinates.

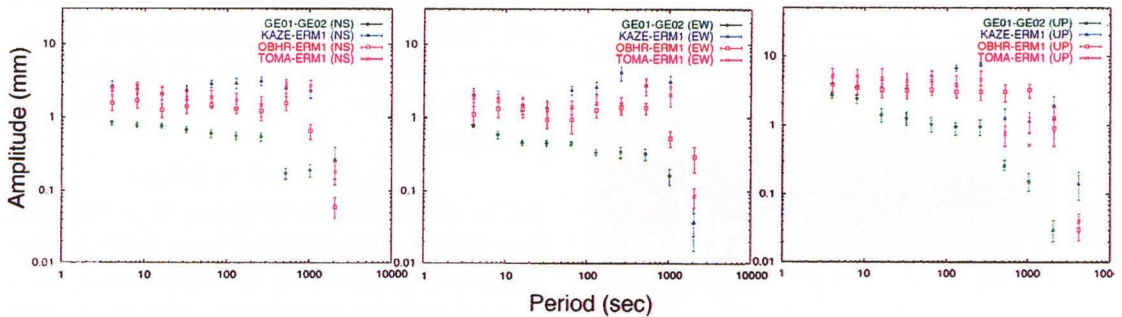


Fig. 7. Noise levels of various baseline lengths in different period ranges. Amplitudes in mm after the noise reduction are shown; left: NS component, middle: E component, right: UD component. Those data which are not plotted are below the minimum level in the figure.

2000 秒振幅 1 cm 程度のノイズが見られる。これらのノイズは前日との差を取ることで除去される。事実、前日との差を取った時系列には 1 cm 程度の定常的ノイズだけが残っている。また、解析期間内で衛星の切り換わりによる大きなノイズは見られなかった。Table 2 に各時系列の分散、平均絶対偏差を示す。前日との差を取ることで時系列の分散は 1/4、平均絶対偏差は 1/2 となり、ノイズを効果的に除去していることがわかる。

3.3 基線長による誤差評価

前日との差を取った時系列は、両観測点が変動していなければ、固定点、移動点間の GPS 計測に伴うノイズである。この大きさを評価することで、高速 GPS 観測が地

震計測機器としてどの程度の変動を検出できるかを調べる。§ 3.1 で導入した平均絶対偏差はノイズに含まれる全ての周期成分から求められる値であり、ノイズの周波数依存性を調べる場合は適切な統計量ではない。ここでは前日との差を取りマルチパスなどの誤差を取り除いた時系列について、特定の周期帯のバンドパスフィルタをかけて各周期ごとにノイズの振幅を読みとることにする。一般的なフーリエ変換で直接周期ごとの誤差の評価も行ったが、用いなかった。それは、GPS 観測データには時々スパイク上の大きなノイズが混入し、そのノイズがスペクトルの推定値に大きく影響し、一般的なフーリエ解析からだけではこのような時系列に含まれるノイズ

の影響を評価できないからである。

フィルタは周期 2^n (s) からその 1.4 倍の周期帯の波を通すバタワース型バンドパスフィルタである。ただし、フィルタをかける時系列のサンプリング間隔は 1 秒であるので 2~2.8 (s) のバンドパスフィルタは計算しても意味がない。また、時系列は 9000 秒の長さを持っているので周期は n が 2 から 13 までとする。Fig. 6 にバンドパスフィルタを通した周期別の GPS 観測ノイズを示す。スパイク状のノイズやインパルス状のノイズがフィルタの影響を受けているが、バックグラウンドのノイズレベルは時間的に大きくは変化していない。ここではバンドパスフィルタをかけたノイズ振幅の 80~90% の振幅を各周期のノイズレベルとしてこれらの図から読みとることにする。

Fig. 7 に各基線長別に読みとったノイズレベルの大きさを成分ごとに示す。横軸は周期 (s)、縦軸はノイズの振幅 (mm) を対数表示している。ノイズ評価には前日との差を取ってノイズが軽減できたものを用いた。誤差棒は 80~90% のノイズレベルを示している。Fig. 7 から基線長が長くなるにつれて、ノイズも大きくなっているこ

とがわかる。風の館 (KAZE)-えりも検潮所 (ERM1) のノイズは苫小牧 (TOMA)-えりも検潮所 (ERM1) のそれよりも大きい。これは KAZE-ERM1 では解析したデータのノイズが特に大きかったためである。いずれの基線長においても、EW 成分のノイズレベルは NS 成分に比べて、小さいことが見てとれる。また、上下動成分のノイズレベルは水平動成分に比べて、2~3 倍大きいこともわかる。上下動成分のノイズレベルは水平動成分の 3~5 倍であったから、ノイズ除去により、少しは改善されていることがわかる。

また、各成分で 1000 秒以上の周期の長いノイズは 1000 秒以下の周期のノイズに比べて 1 桁以上小さいことがわかった。これは高速サンプリング GPS 観測におけるノイズの長周期成分は極めて小さいということを示している。NS 成分について、最も基線長の短い GE01-GE02 ではすべての周期帯で水平成分は ± 1 mm 以下、周期 4 秒帯で鉛直成分は最大 ± 3 mm 程度のノイズがある。最も基線長の長い TOMA-ERM1 では、すべての周期帯で水平成分で ± 4 mm 以下、鉛直成分では ± 7 mm 以下のノイズレベルである。

原理的には上に述べた振幅より大きな地震動変位があれば、GPS 計測からその振動を取り出せることになる。このノイズレベル以上の変動をもたらす地震の大きさを、以下の気象庁マグニチュードの定義式で評価する [宇津 (1991)]:

$$M_j = \log A_H - 0.83 + 1.73 \log \Delta$$

ただし、 A_H は水平成分最大振幅 (μm) で、 Δ は震央距離 (km) である。たとえば観測点で 5 mm を超える地動を発生させる地震の大きさは、震央距離 10 km でマグニチュード 4.6, 50 km で 5.8, 100 km で 6.3 である。気象庁マグニチュードを与える地震動の周期は数秒 (3~5 秒) であることが知られている [KOYAMA (1997)]。地震計や人間はこれより長い周期の地震動に鈍感であるが、より長い周期の地震動は、伝播に伴うエネルギー減衰も小さく、マグニチュードが 5 を超えるような地震では震源での励起もより大きい。さらに GPS 観測ではノイズレベルが長い周期帯で小さくなるから、ここでの推定値よりもよりマグニチュードの地震による波動を検出することが可能であろう。ここで、GPS 観測から地震動に伴う地表変動をとらえられる可能性、その定量的な推定ができたことになる。これは、高速 GPS 観測を行うことで、周期数秒より長い帯域で周波数特性が平坦な長周期強震計としての役割も果たすことができることが明らかになった。

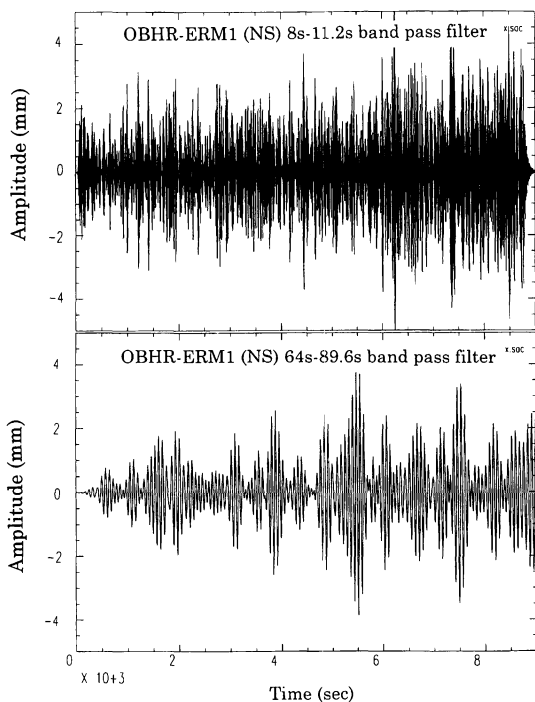


Fig. 6. Variation of NS coordinate of OBHR respect to that of ERM1 after band-pass filtered. The pass band of the top is from 8 to 11.2 s and that of the bottom is from 64 to 89.6 s.

§ 4. 結 論

本研究では、連続高速サンプリング GPS 観測システムを独自に構築し、そこで得られた GPS 観測データを解析して、観測点における座標時系列のノイズの性質・ノイズレベルをさまざまな周期帯で評価した。GPS 観測点に固有なマルチパス、GPS 衛星の配置に伴うノイズは衛星配置が約 1 日周期で繰り返すので、前日や翌日の観測データとの差を取ることで除去できる。ただ一律に観測データの差を取っても、観測している衛星の切り替わり時など、観測点間で共通の衛星の電波を受信していないときのノイズは前日との差を取っても除去できない場合がある。特に受信する衛星が切り替わる時に発生するノイズは大きく、現在のところ取り除けない。

実際に高速 GPS 観測で得られたデータを kinematic 法で解析した結果、観測点座標値の時系列に含まれるノイズは周期が短いほど大きく、周期 4 秒帯と 1000 秒以上の長い周期帯で比較すると前者が 10 倍以上大い。短基線の場合、ノイズレベルは水平方向でおよそ ± 1 mm 以下、鉛直方向で ± 3 mm 以下である。長基線の場合、水平方向で ± 4 mm 以下、鉛直方向で ± 7 mm 以下であることがわかった。本研究でなされた周期ごとのノイズレベル評価によって、高速 GPS 計測は、基線長 150 km 以内で水平方向で 5 mm、鉛直方向で 1 cm 以上の変動をとらえることのできる帯域無制限の変位型の強震計として使用できることがわかった。短いタイムスケールの現象に GPS 計測が拡張されることで、GPS は地震観測にも応用され、その目安として震央距離が 50 km で気象庁マグニチュード 5.8 程度の地震を検知することが可能であることが示された。今後さらにノイズの低減に努力し、アレー観測などから、GPS 計測を広帯域地震・地殻変動観測機器として活用していきたい。

謝 辞

北海道大学笠原稔教授には、GPS 受信機を提供して頂き、同苫小牧地方演習林日浦勉林長、えりも町えりも風の館職員一同、帯広畜産大学小柳敏郎教授には、観測点設置にご協力を頂きました。また、国立天文台日置幸介助教授、東北大学三浦 哲助手、東京大学中尾 茂助手には、解析ソフトウェアに関してさまざまなご指導を頂きました。九州大学大学松島 健助手には GPS 受信機とその周辺に関して多くのご指導を頂きました。こ

に記して深く感謝の意を表します。

文 献

- HEKI, K. and Y. TAMURA, 1997, Short term afterslip in the 1994 Sanriku-Haruka-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 3285–3288.
- HEKI, K., S. MIYAZAKI and H. TSUJI, 1997, Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench, *Nature*, **386**, 595–598.
- HIRAHARA, K., T. NAKANO, M. KASAHARA, H. TAKAHASHI, R. ICHIKAWA, S. MIURA, T. KATO, S. NAKAO, Y. HIRATA, Y. KOTAKE, T. CHACHIN, F. KIMATA, K. YAMAOKA, T. OKUDA, H. KUMAGAI, K. NAKAMURA, K. FUJIMORI, T. YAMAMOTO, T. TERASHIMA, J. P. L. CATANE, K. TADOKORO, A. KUBO, S. OTSUKA, A. TOKUYAMA, T. Tabei, T. IWABUCHI and T. MATSUSHIMA, 1996, GPS observations of post-seismic crustal movements in the focal region of the 1995 Hyogoken Nanbu earthquake—Static and real-time kinematic GPS observations—, *J. Phys. Earth*, **44**, 301–315.
- 菊地正幸, 1996, 遠地実体波解析 12 月 3 日 日向灘の地震 (M_s 6.7), *EIC 地震学ノート*, 9.
- KOYAMA, J., 1997, *The complex faulting process of earthquakes*, Kluwer Academic Publishers, 1–194.
- 万納寺信崇・多田英夫, 1997, 国土地理院 GPS 観測網による可降水量を用いた数値予報の例, *GPS 気象学ワークショップ予稿集*, 47–48.
- 宮崎真一・鷺谷 威・多田 堯・畑中雄樹, 1998, GPS 観測網の地震計としての応用, *GPS 合同シンポジウム予稿集*, 16.
- 宮崎真一, 畑中雄樹, 1998, 国土地理院 GPS 連続観測システムの概要, *気象研究ノート*, **192**, 105–132.
- ROTHACHER, M. and L. MERVART, 1996, *Bernese GPS Software Version 4.0*, Astronomical Institute, University of Bern, 1–418.
- TOPCON, 1993, *TOPCON GPPS—GPS Post-Processing System Manual—Software Version 5.0.00*, 1–486.
- 土屋 淳・辻 宏道, 1999, 改訂版 GPS 測量の基礎, *日本測量協会*, 1–276.
- TSUJI, H., Y. HATANAKA, T. SAGIYA and M. HASHIMOTO, 1995, Coseismic crustal deformation from the 1994 Hokkaido-Toho-oki earthquake monitored by a nationwide continuous GPS array in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1669–1672.
- 宇津徳治, 1991, 地震学, 共立全書, 113–140.
- 吉田康宏・干場充之・石川有三・葛 林林・伊沢光麿・橋元成拓・檜 森茂, 1999, GPS は変位計として使えるのか?, 1999 年日本地震学会秋季大会講演予稿集, B75.