

西太平洋～東アジアの GPS 連続観測点座標の時系列 (1995年7月16日—2000年12月31日)

小竹美子¹⁾・加藤照之¹⁾*・中尾 茂¹⁾・松島 健²⁾

¹⁾ 東京大学地震研究所

²⁾ 九州大学大学院理学研究院 附属地震火山観測研究センター

Time series of site coordinates from permanent GPS arrays in the western Pacific and East Asia (July 16, 1995-December 31, 2000)

Yoshiko Kotake¹⁾, Teruyuki Kato¹⁾, Shigeru Nakao¹⁾ and Takeshi Matsushima²⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

²⁾ Earthquake and Volcano Observatory, Graduate School of Science, Kyushu University

Abstract

We have analyzed GPS data at permanent sites in the western Pacific and East Asia for the period from July 16, 1995 to December 31, 2000. This report shows the time series of the estimated site coordinates. We used Bernese V4.2 BPE software together with IGS final orbits. First, we made a fiducial free analysis including six IGS global fiducial sites. Then, the coordinates at all sites were fixed to ITRF97 velocity at the Tsukuba IGS site, which is nearly consistent with NNR-NUVEL1. The coordinate time series shown in this article may provide us with tectonic motions of the GPS sites, as well as noise characteristics of the data. A discussion is added in that the reference frame to fix site coordinates is a key issue for obtaining better velocity estimates at GPS sites. We used only one site at Tsukuba to fix coordinates at all GPS sites in this study. However, fixing only one site might introduce a small but significant rotational error in the network. Therefore, estimates of velocities at GPS sites may have to be improved by giving constraints at multiple surrounding sites.

Key words: GPS, western Pacific, East Asia, tectonics

1. はじめに

著者らは、全国の GPS 関連研究者と協力しつつ、1990年代はじめより約10年間にわたって、西太平洋～東アジア地域に GPS 連続観測網を構築し、データ解析を実施してきた。これらの成果は既に各所に発表してきた(例えば、Kato *et al.* (1998), 小竹他 (1998a), 小竹 (2000), 小竹 (2002))。また、関連した研究成果としては小竹他 (1998b) や Kato *et al.* (2003) などがある。この間、西太平洋から東アジアの地域では、連続観測点が次第に増加し、日本を除いても数十の観測点が設置されデータが IGS 等を通じて研究者間で自由な解析の用に

供されている。我々も、鋭意新たな観測点データを取り込みながら解析を実施してきたが、2000年末までのデータ解析が終了したので、本データが当該地域の様々な測地学的・地球物理学的な研究に用いられることを期待して、資料として報告することにした。

この資料では、解析結果を観測点毎に時系列として示す。後に述べるように、基準座標系に若干の問題があり、時系列データから推定される観測点移動速度をそのままその点の地殻変動とするには問題があるが、このような時系列データを眺めるだけでもある程度その地域のテクトニックな変動の様子は推察されるし、もっと重要な

* e-mail: teru@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区本郷 7-3-1)

こととして、各観測点での誤差特性などが読み取れるだろうから、データを再解析しようとする読者にはある程度の参考となるだろう。本報告の時点でデータの整理が必ずしも十分でないで「資料」として公表することとした。

2. 観測データ

本報告で用いた GPS 観測点は Fig. 1 及び Table 1 に示されている 59 点である。この中には観測点を近くに移設したり、アンテナ高が変わっただけの観測点も別の観測点としてあり、Fig. 1 では同一点になるが Table 1 では区別してある。また、時系列の図 (Fig. 2(1)~(59)) ではそれらについては別々の図として表示してある。Table 1 に観測点要素をまとめて示す。それぞれの観測点のデータは著者らが入手できた範囲内のものを解析したので、実際にはもっと存在しているかもしれない。また、データ期間は、データ解析の最初と最後の日付である。解析は 1995 年 7 月 16 日から 2000 年 12 月 31 日までの約 5 年半 (通算 1996 日) である。

観測データは、IGS に登録されて研究者に供されている観測点のほか、著者らが構築してきた西太平洋 GPS 連続観測網 (WING) の観測点 9 点、国土地理院が IGS 観測点として登録していた 6 点、及び GPS 気象学プロジェクトによって中国に設置された 2 観測点のデータを用いた (Table 1 を参照)。

3. データ解析と結果

データ解析においては、24 時間毎のデータ (UT00-24 h) を 1 セットとし、Bernese software V4.2 BPE 基線解析ソフトウェアを使用した (Rothacher and Mervart, 1996)。基準座標系については我々の以前の解析 (例えば Kato *et al.* (1998) や小竹 (2000)) では ITRF94 を用いてきたが、より新しく精度が高いと考えられる ITRF97 を用いた (Boucher *et al.*, 1999)。より最近では ITRF 2000 が用いられる場合が多くなってきたが、ITRF97 と ITRF2000 では解はほとんど異ならないだろうと考えている。

解析の手法としては、まず、いずれの観測点座標も固定せず基線長を精度よく推定する fiducial free と呼ばれる手法 (例えば Heflin *et al.*, 1992) を採用した。ただし全観測点を全く free にしてしまうと数値計算において最小二乗解が得られない可能性が大きくなるので、精度の良い IGS 基準点をゆるく拘束することで、上記の目的を達することができる。なお、この fiducial free の解析ではデータ取得時の IGS 精密暦の座標系を用いて解

いている。IGS 精密暦の座標系は時と共に変わるので、得られた結果を全期間で同じ系 (ここでは ITRF97) に統一する必要がある。最後につくば IGS 観測点 (TSKB) の、ITRF97 による 1995 年 7 月 16 日 (第 1 日) から 2000 年 12 月 31 日 (第 1996 日) までの座標値を算出して固定し、他の観測点での座標値を求めた。位置解析の詳細については小竹 (2000) を参照されたい。ITRF 系ではプレート運動として Argus and Gordon (1991) による NNR-NUVEL1 を採用しており、従って、本方式で推定された各観測点の変位速度は NNR-NUVEL1 に準拠したものとなる。但し、ITRF では、その実現値を得る (すなわち登録観測点の変位速度を推定する) ために様々な重み付最小二乗法を行っている。そのため、つくば IGS 観測点に与えた ITRF97 の速度も、おおもとの Argus and Gordon (1991) による定義とは少し異なっている可能性がある。

図 2(1)~(59) が基線解析結果から得られた各観測点での ITRF97 座標系による時系列図である。横軸は時間で単位は「日」、縦軸は cm である。横軸の原点は解析開始の 1995 年 7 月 16 日であり、右端は 2000 年 12 月 31 日である。図は上から南北成分 (u ; 上が北)、東西成分 (v ; 上が東)、上下成分 (w) である。誤差は座標値推定の形式誤差 (標準偏差) の 3 倍 (3σ) で示した。

以下、時系列を検討するうえでいくつかの観測点に関するコメントを以下に記す。

- ・ Chuuk (Fig. 2(9)) は受信機の不調が続いていてデータが途切れているが、近い将来復帰する予定である。
- ・ WING 観測点のうち、Ishigaki (Fig. 2(16)), Marcus (Fig. 2(30)), Manila (Fig. 2(29)) は既に観測を終了している。Manila は近傍に Quezon City (Fig. 2(41)) が出来ているので、今後はこちらを用いるべきであろう。Ishigaki, Marcus はいずれも国土地理院によって GEONET 観測点が建設されている。
- ・ Midway (Fig. 2(31)) は観測を開始したものの、同島への定期便が中断されたため観測も中断している (宗包, 私信, 2003)。
- ・ Palau (Fig. 2(36), (37)) は 2000 年 6 月はじめにアンテナ基台を約 1 m かさ上げした。現地での計測では 0.966 m となっている。pala1, pala2 はこの前後の時系列である。Fig. 3. にこれらをつなげた時系列を示す。水平位置ではオフセットのないことがわかる。
- ・ Petropavlovsk Kamchatka (Fig. 2(38), (39)) は当初設置した観測点 (petr) が電波の雑音のため、1999 年はじめに近傍の観測点 (petp) に移設された (IGS site log petp_20000214.log による)。



Fig. 1. Black dots are GPS sites in the western Pacific and East Asia used for estimating coordinates. Open dots are the IGS fiducial sites used for the global analysis.

Table 1. GPS stations used for data analysis.

Fig No.	Station Name	4-ch. code	Lat. (degN)	Long. (degE)	Ellips. H. (m)	Receiver type	Antenna type	Antenna H. (m)	Data period	Project
(1)	Almaty	SELE	43.17873	77.01690	1342	Regue SNR-8000	Dorne Margolin T	0.0901	1997/243 -- 2000/366	
(2)	Arti	ARTU	56.42982	58.56045	248	Ashtech Z-XII3	ASH700936D_M	0.0796	1999/219 -- 2000/365	
(3)	Bangalore	IISC	13.02116	77.57037	844	Regue SNR-8000	Dorne Margolin T	0.078	1995/302 -- 2000/366	
(4)	Beijing	BuFS	39.60880	115.89248	87	Ashtech Z-XI3	ASH700936E_M	0.046	1999/297 -- 2000/366	
(5)	Bilibino	BILI	68.07613	166.43796	456	Ashtech Z-XI3	ASH700936E_M	0.0792	1999/248 -- 2000/366	
(6)	Bishkek	POL2	42.67977	74.69426	1714	Regue SNR-8000	Dorne Margolin T	0.078	1995/365 -- 2000/366	
(7)	Changchun	CHAN	43.79059	125.44451	273	Turbo Regue SNR-8000	Dorne Margolin T	0.2016	1997/312 -- 2000/259	China-Japan Coop. Res.
(8)	Chichijima	CCJM	27.09558	142.18458	209	Ashtech Z-XI3	Geodetic L1/L2 P	0.0	1997/001 -- 2000/366	GSI IGS
(9)	Chuuk	TRUK	7.44702	151.88725	114	Trimble 4000SSE	Compact L1/L2 GND	0.0	1995/339 -- 1999/319	WING
(10)	Cibinong	BAKO	-6.49105	106.84891	158	Trimble 4000SSI	TRM14532.0	1.676/1.616	1998/100 -- 2000/366	
(11)	Cocos Island	COCO	-12.18835	96.83397	-35	Regue SNR-8100	Dorne Margolin T	0.004	1997/273 -- 2000/366	
(12)	Darwin	DARW	-12.84371	131.13274	125	Ashtech Z-XI3	Dorne Margolin T	0.0	1999/141 -- 2000/366	
(13)	Diego Garcia Island	DGAR	-7.26969	72.37024	-65	Regue SNR-8000	Dorne Margolin T	0.0814	1999/001 -- 2000/366	
(14)	Guam	GUAM	13.58933	144.86836	202	Regue SNR-8000	Dorne Margolin T	0.0614	1995/201 -- 2000/366	
(15)	Irkutsk	IRKT	52.21902	104.31624	502	Turbo Regue SNR-8000	Dorne Margolin T	0.128	1995/286 -- 2000/366	
(16)	Ishigaki	ISHI	24.38134	124.23610	46	Trimble 4000SSE	Compact L1/L2 GND	1.0	1995/197 -- 1999/151	WING
(17)	Jabiru	JAB1	-12.65885	132.89390	82	AOA ICS-4000Z ACT	ASH700936D_M	0.009	1999/001 -- 2000/366	
(18)	Jayapura	ANGS	-2.51458	140.70431	444	Trimble 4000SSE	Compact L1/L2 GND	0.0	1997/063 -- 2000/366	WING
(19)	Kanoya	KNYA	31.42531	130.87857	135	Ashtech Z-XI3	Geodetic L1/L2 P	0.0	1997/001 -- 2000/366	GSI IGS
(20)	Kitab	KIT3	39.13477	66.88544	623	Turbo Regue SNR-8000	Dorne Margolin T	0.046	1995/197 -- 2000/363	
(21)	Kodiak	KODK	57.73511	-152.50138	38	Ashtech Z-XI3	ASH701933E_M	0.0	2000/039 -- 2000/366	
(22)	Krasnovarsk	KSTU	55.98325	92.79383	210	Regue SNR-8000	Dorne Margolin T	0.046	1997/243 -- 2000/214	
(23)	Kumming	KUNM	25.02954	102.79719	1986	Regue SNR-8000	Dorne Margolin T	0.0793	1998/321 -- 2000/366	
(24)	Kwajalein	KWJ1	8.72220	167.73024	38	Regue SNR-8000	Dorne Margolin T	0.630	1996/077 -- 2000/349	
(25)	Lhasa	LHAS	29.65734	91.10399	3625	Regue SNR-8000	Dorne Margolin T	0.058	1995/197 -- 2000/366	
(26)	Lintong	XIAN	34.36867	109.22149	4644	Regue SNR-8100	Dorne Margolin T	0.3840	1996/193 -- 1999/314	
(27)	Magadan	MAGO	59.57575	150.77002	362	Ashtech Z-XI3	Dorne Margolin ASH Model	0.080	1997/365 -- 2000/366	
(28)	Male Airport	MALD	4.18868	73.52628	-92	Leica CRS1000	Leica T504	0.0	1999/224 -- 2000/365	
(29)	Manila	MANIL	14.59821	120.97271	57	Trimble 4000SSE	Compact L1/L2 GND	0.066	1995/197 -- 1998/329	WING

西太平洋～東アジアの GPS 連続観測点座標の時系列 (1995 年 7 月 16 日～2000 年 12 月 31 日)

(30)	Marcus	MARC	24.29023	153.97861	33	Trimble 4000SSE	Compact L1/L2 GND	0.4644	1995/197 -- 2000/138	WING
(31)	Micway	MIDW	28.21543	-177.36976	6	Trimble 4000SSE	Geodetic L1/L2 P	0.0	1999/061 -- 2000/152	GSI
(32)	Mizusawa	MZSW	39.11062	141.20392	172	Ashtech Z-XII3	Geodetic L1/L2 P	0.0	1997/001 -- 2000/366	GSI IGS
(33)	Novosibirsk	NVSK	54.84061	83.23544	123	Trimble 4700	TRM33429.00+GP	6.1546	2000/350 -- 2000/366	
(34)	Norilsk	NRIL	69.36183	88.35978	48	Ashtech Z-XII3	ASH701945E_M	0.0795	2000/261 -- 2000/366	
(35)	Okhawa	OKNW	26.14482	127.76892	128	Ashtech Z-XII3	Geodetic L1/L2 P	0.0	1997/001 -- 2000/366	GSI IGS
(36)	Palau 1	PALA	7.34087	134.47546	91	Trimble 4000SSE	Compact L1/L2 GND	0.0774	1996/117 -- 2000/156	WING
(37)	Palau 2	PALA	7.34087	134.47546	92	Trimble 4000SSE	Compact L1/L2 GND	1.0434	2000/161 -- 2000/366	WING
(38)	Petropavlovsk Kamchatka 1	PETR	53.06675	158.60696	211	Rogue SNR-8000	Dome Margolin T	0.0796	1997/365 -- 1998/282	
(39)	Petropavlovsk Kamchatka 2	PETP	53.06673	158.60708	210	Ashtech Z-XII3	Dome Margolin T	0.0435	1999/001 -- 2000/366	
(40)	Port Moresby	MORE	-9.43410	147.18672	123	Ashtech Z-XII3	Geodetic L1/L2 P	0.0	1996/313 -- 2000/174	WING
(41)	Quezon City	PIMO	14.63572	121.07773	96	Rogue SNR-8000	Dome Margolin T	0.0792	1999/112 -- 2000/262	
(42)	Sheshan (Shanghai)	SHAO	31.09984	121.20044	22	Rogue SNR-8100	Dome Margolin T	0.0814	1995/197 -- 2000/363	
(43)	Shin-Totsukawa	STKW	43.52882	141.84477	119	Ashtech Z-XII3	Geodetic L1/L2 P	0.0	1997/001 -- 2000/366	GSI IGS
(44)	Singapore	NTUS	1.34580	103.67996	75	Rogue SNR-8000	Dome Margolin T	0.0776	1997/242 -- 2000/224	
(45)	Suwon-shi	SUWN	37.27552	127.05424	82	Turbo Rogue SNR-8000	Dome Margolin T	1.570	1997/334 -- 2000/366	
(46)	Taejeon	TAEJ	36.37442	127.36608	77	Trimble 4000SSI	TR GEOD L1/L2 P	0.6604	1995/197 -- 1999/076	
(47)	Taejeon	DAEJ	36.39942	127.37448	117	Trimble 4000SSI	TR GEOD L1/L2 P	0.0	1999/078 -- 2000/366	
(48)	Taipei	TAIW	25.02133	121.53654	44	Rogue SNR-8000	Dome Margolin T	1.7686	1995/201 -- 1997/336	
(49)	Tianjin	TIAN	39.10105	117.27383	23	Ashtech Z-XII3	Geodetic L1/L2 P	0.1470	1997/307 -- 1999/365	China-Japan Coop. Res.
(50)	Tixi	TI XI	71.63447	128.86642	47	Ashtech Z-XII3	ASH700936D_M	0.0792	2000/001 -- 2000/366	
(51)	Tohoku	TOHK	35.49040	133.69900	73	Ashtech Z-XII3	Geodetic L1/L2 P	0.0	1997/001 -- 2000/366	GSI IGS
(52)	Tsukuba-igs	TSKB	36.10568	140.08750	67	Turbo Rogue SNR-8000	Dome Margolin T	0.0	1995/197 -- 2000/366	
(53)	Urumqi	URUM	43.80795	87.60066	859	Rogue SNR-8000	Dome Margolin T	0.046	1998/305 -- 2000/366	
(54)	Usuda	USUD	36.13311	138.36204	1509	Rogue SNR-8100	Dome Margolin T	-0.035	1995/197 -- 2000/366	
(55)	Vladivostok	VLAD	43.19732	131.92594	87	Trimble 4000SSE	Compact L1/L2 GND	0.0764	1996/050 -- 2000/366	WING
(56)	Wuhan 1	WUHN	30.53165	114.35726	28	Rogue SNR-8000	Dome Margolin T	2.355	1996/025 -- 1998/341	
(57)	Wuhan 2	WUHN	30.53165	114.35726	26	Rogue SNR-8000	Dome Margolin T	2.355	1998/342 -- 2000/366	
(58)	Yakutsk	YAKZ	62.03101	129.68101	100	Rogue SNR-8000	Dome Margolin T	0.0796	1997/365 -- 2000/366	
(59)	Yuzhno-Sakhalinsk	YSSK	47.02974	142.71672	91	Ashtech Z-XII3	ASH701933B_M	0.0798	1999/212 -- 2000/366	

China-Japan Coop. Res. : Data was provided from China Seismological Bureau based on the China-Japan Cooperative Research on GPS Meteorology

GSI-IGS : Data was taken from IGS registered GSI sites

WING : Data from the Western Pacific Integrated Network of GPS (WING) Other data were taken from IGS data resource.

・中国上海の Sheshan の時系列 (Fig. 2(42)) の 400 日付近に見られる上下成分のとびはアンテナ高の入力ミスによるものであり、ジャンプ後の高さが正しい解を与えている。

・韓国の Taejeon (Fig. 2(46), (47)) では 1999 年 3 月に市内の別の施設に観測点が移設された。このため、コードが TAEN から DAEN に変更になった。

・Wuhan (Fig. 2(56), (57)) では、観測点が途中変更になっているようである。IGS の Site log に記述がないので詳しいことは不明であるが、水平位置はずれていないので、アンテナ高を変えただけかもしれない。

・Changchun (Fig. 2(7)) と Tianjin (Fig. 2(49)) は GPS 気象学プロジェクトによって日中共同研究としてデータを入手したものである。未処理の観測データがあるので今後解析を続けることでより精度の高い速度場が求められると考えられる。

このほかにも時系列を見ているといろいろ気づかれることもあるが、詳しい検討と解釈は今後の課題としたい。

4. 考 察

本資料を今後より詳細に検討するにあたって注意する点がいくつかあると思われるが、最も重要なのは固定した基準座標系の問題である。上で述べたように、解析の際には、まず、精度よく座標値が求められている観測点をゆるく拘束して解析を実施した。これは固定点に誤った座標値を仮定することから生じる誤差を避け、基線長を正確に推定するためである (Heflin *et al.*, 1992)。この手法により全期間のデータを解析し、その後つくばの IGS 点の座標を、ITRF97 基準座標系から推定される座標値に固定して全座標値を推定した。しかし、このように 1 点で固定すると観測網に微小な回転の誤差を生じる恐れがある。これは、各日ごとの解析を固定する際にも、結果としての時系列から推定する速度場についても両方に言えよう。本研究では遠方の IGS 観測点を解析に加えることでこのような回転を避けようと考えたが、つくばから距離が遠くなるに従って次第に繰り返し誤差が大きくなっていくように見えるのは、各観測点における固有の雑音やつくばからの距離が遠くなることによる誤差伝播のほか、つくばを中心とした微小な網の回転が混入している可能性もあると考えられる。また、速度ベクトル場についても、特に解析期間が長くなるにつれ、次第に回転誤差成分が白色雑音に比べて顕著になることが考えられる。このような誤差を避けるためには、できるだけ遠方の複数の観測局を最後に強く拘束することである程

度は解決できよう。我々の場合、西太平洋～アジアにかけての地域という、欧米の IGS 基準局からはかなり遠い地域であり、解析当初の 1995 年頃はアジアにはほとんど IGS 基準観測点がなかったため、やむをえず、このような方式を用いたが、IGS 観測点が相当数増加した今日では上に記述したようによりよい方式で観測点座標を拘束する必要があるだろう。また、つくばの IGS 点を固定すると、この場所の局所的な変動も気にかかることである。つくばに局所的な大きな変動があると、全部の観測点にオフセットを生じる。図を見るとそのような全体のオフセットは見られないようであるが、今後より詳細な検討が必要であろう。

東アジアから西太平洋地域のテクトニクスを論じる際にはユーラシア安定部を基準とした速度場が比較的良好に用いられる。このために、例えば小竹・加藤 (2001) は Nocquet *et al.* (2001) に従って、ヨーロッパ東部の 11 観測点から構成される領域をユーラシア安定部とし、これに相対的なフィリピン海プレートの Euler 極を求めている。このような、実際のユーラシア安定部を見出す試みは他でも行われている (Argus, personal communication)。グローバルな GPS 解析に基づくプレート相対運動の推定なども行われており (Sella *et al.*, 2002)、今後はこれらに準拠して観測点座標 (あるいは速度) を推定するのが適切であろうと考えられる。

5. 終わりに

本解析で用いた RINEX データや解析結果の SINEX ファイルや正規方程式ファイル (Bernese で NEQ ファイルと呼ばれているもの) 等はすべて公開される予定である。これらを用いれば読者が独自の解析を行うことができる。東アジアから西太平洋の地域はテクトニクス研究の上でも世界で第一級の重要性を持つ地域であるといつてよく、数多くのキャンペーン観測が実施されている。本解析では連続観測局のみのデータ解析を行ったが、このようなキャンペーン観測の解析においても我々の用いた SINEX ファイルや NEQ ファイルを活用することにより、より効率的な解析と研究が行えることを期待したい。

謝 辞

WING 観測点の建設及び保守については海半球プロジェクト関連経費や地震予知研究経費並びに文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B) (2) (課題番号: 11440129; GPS 統合処理によるアジア～太平洋のテクトニクスの研究) を用いた。Midway の観測データは国土地理院に

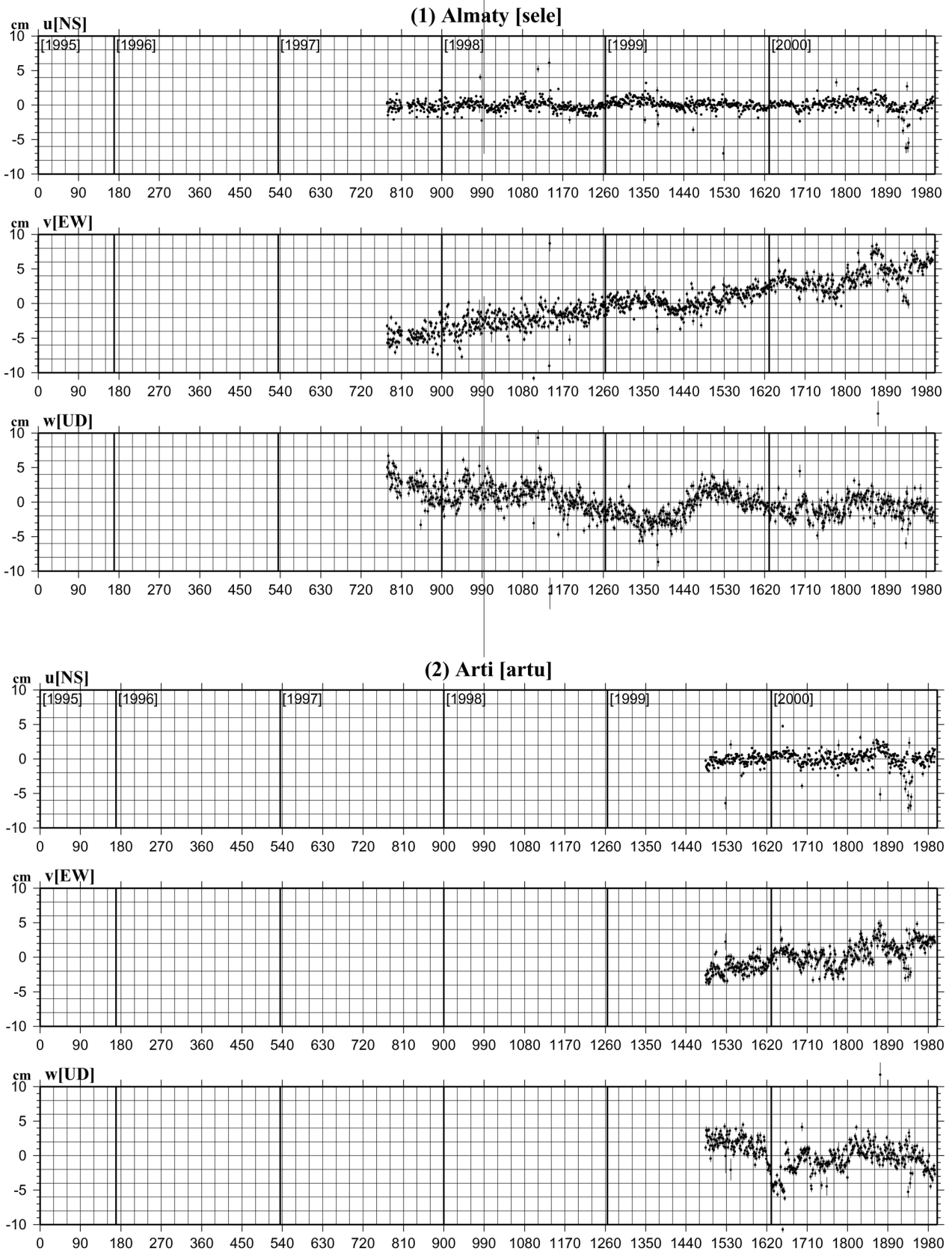


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

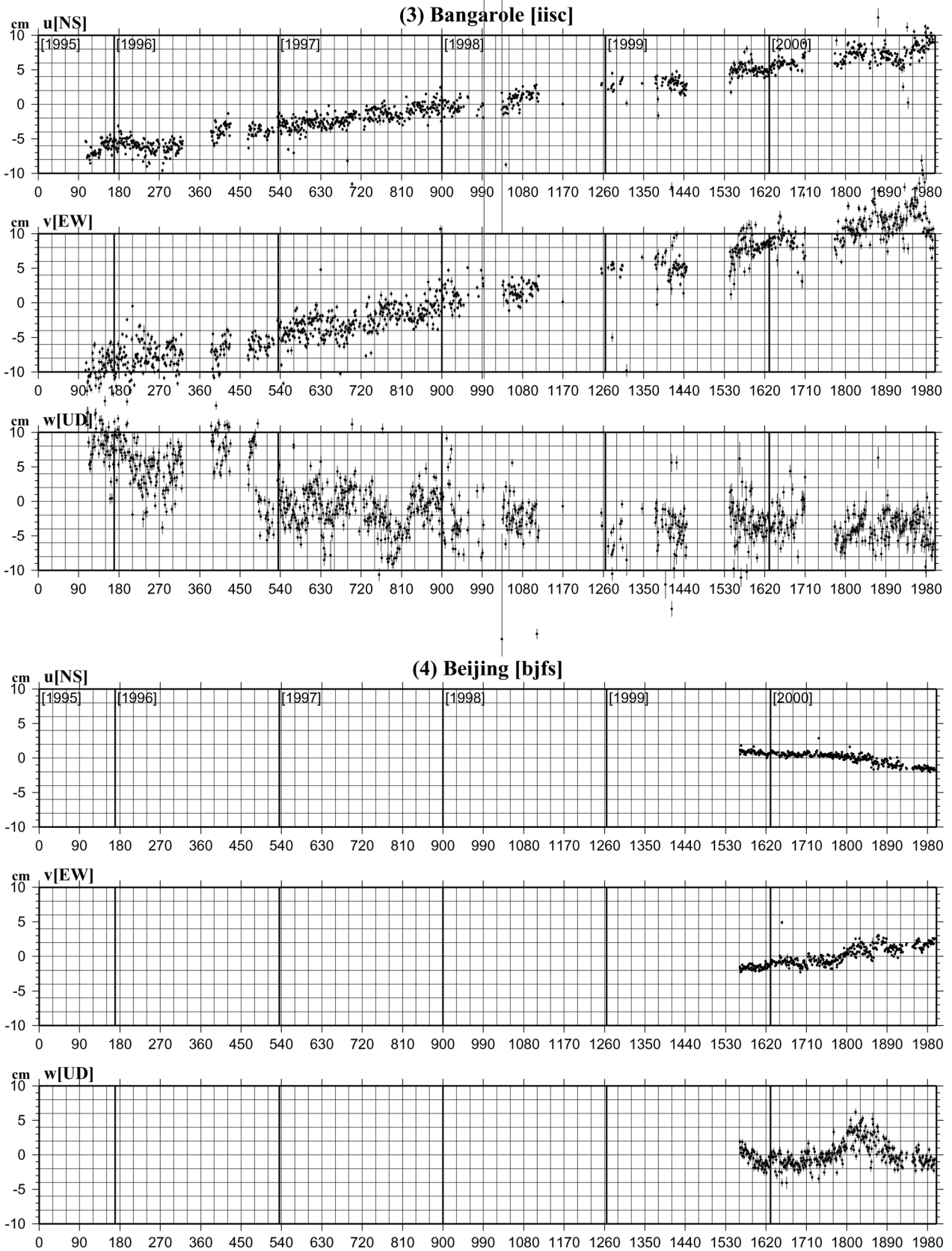


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

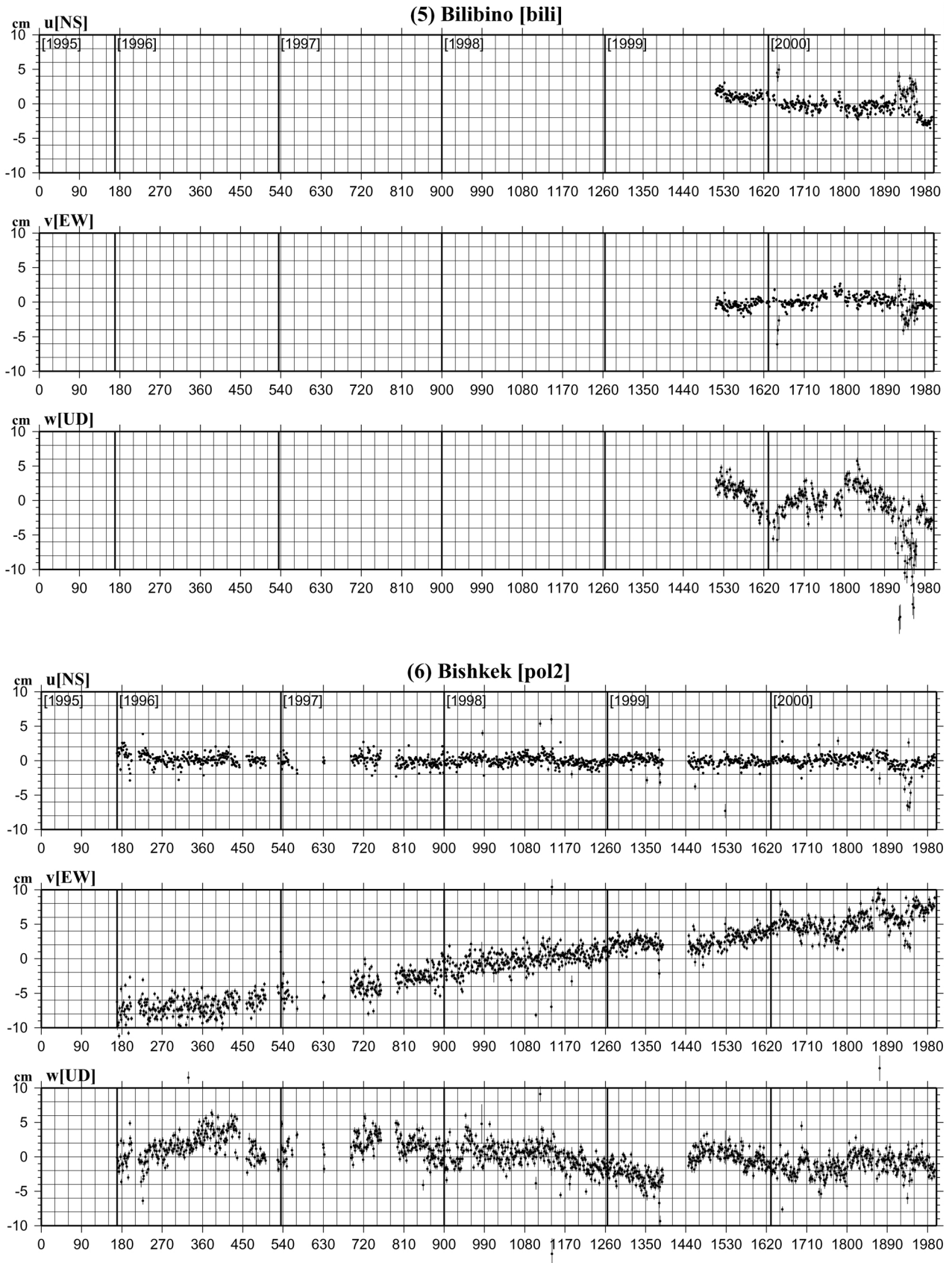
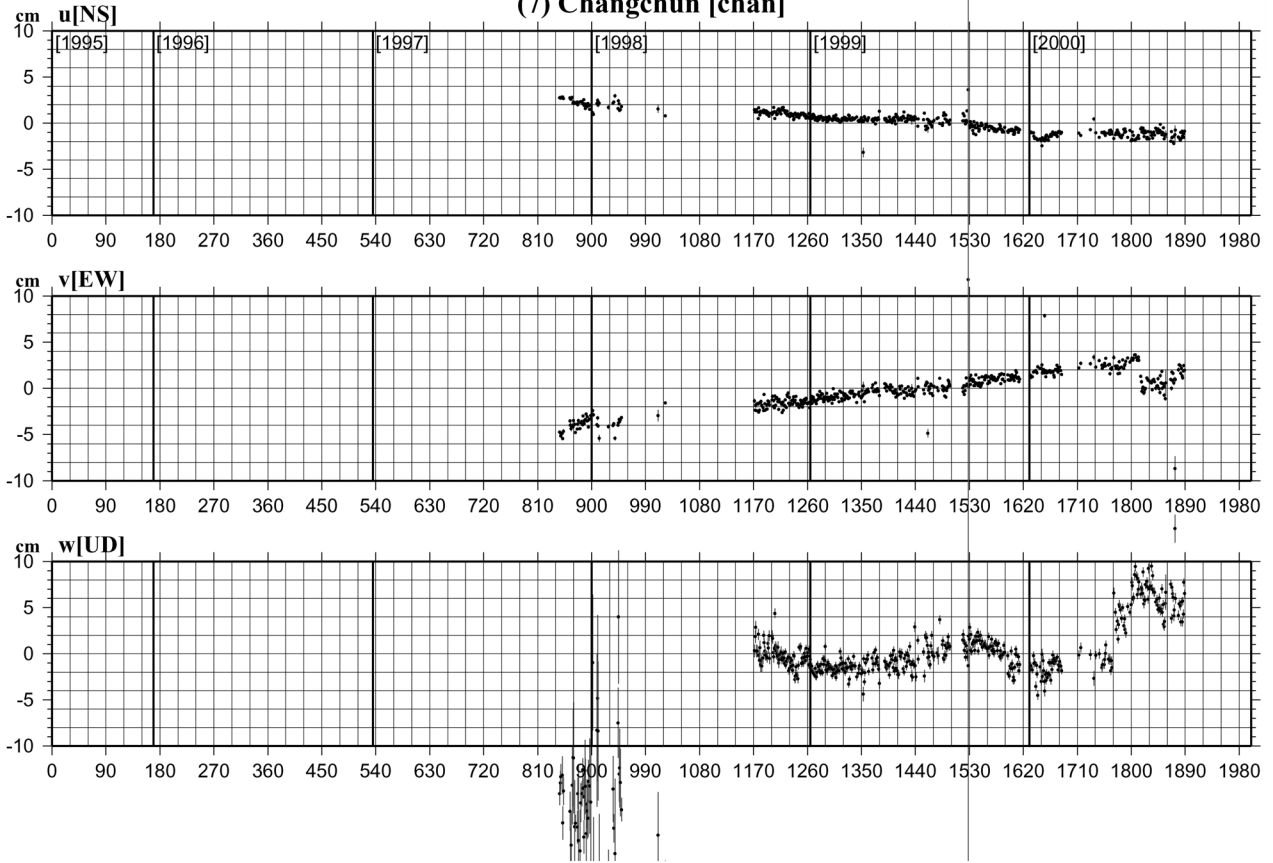


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

(7) Changchun [chan]



(8) Chichijima [ccjm]

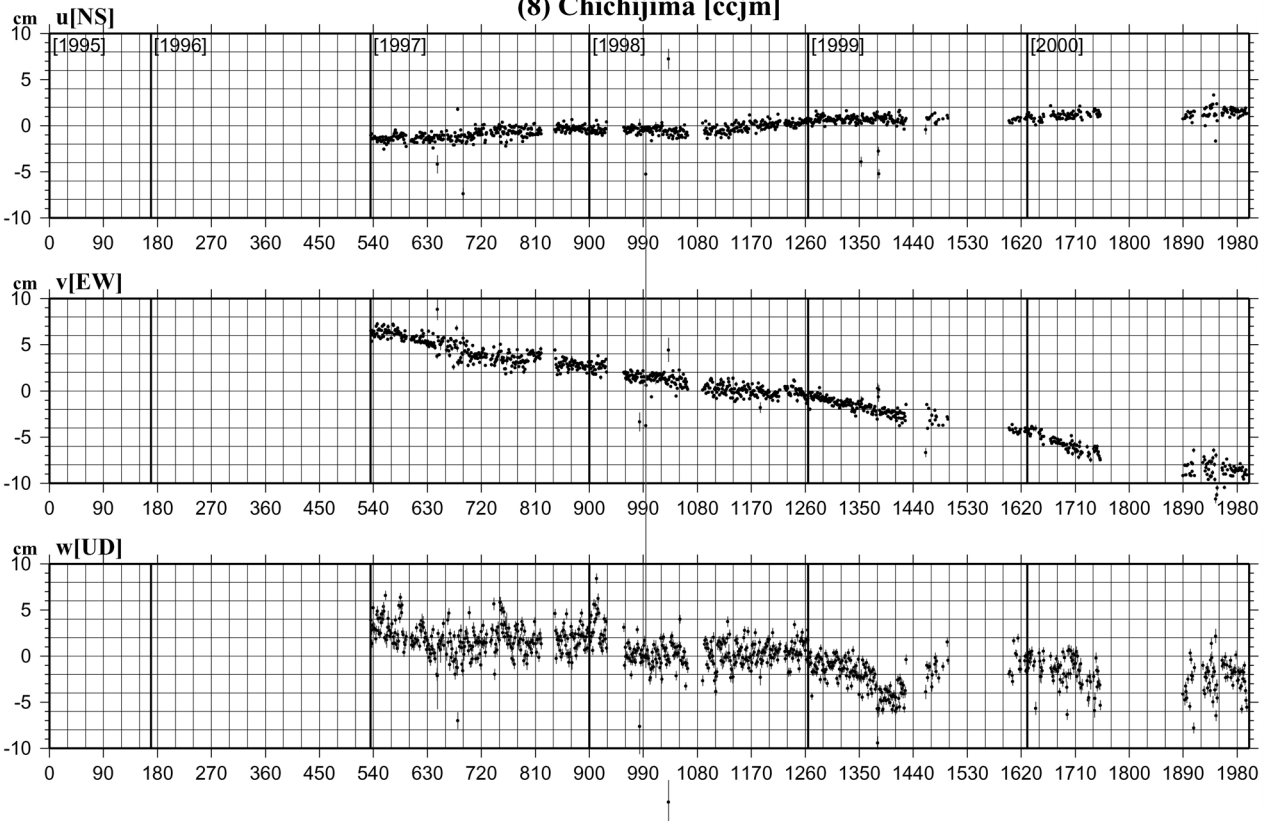


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

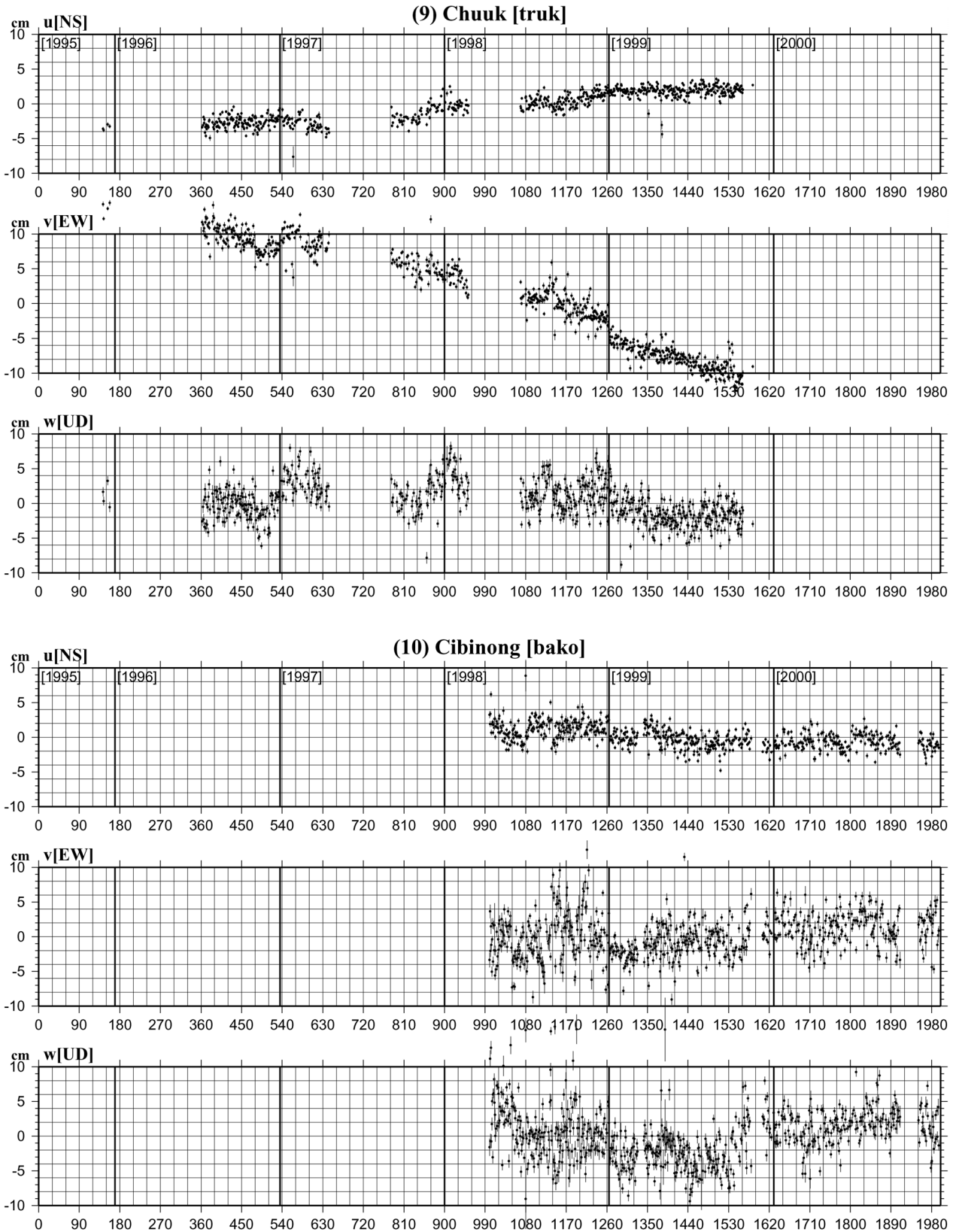


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

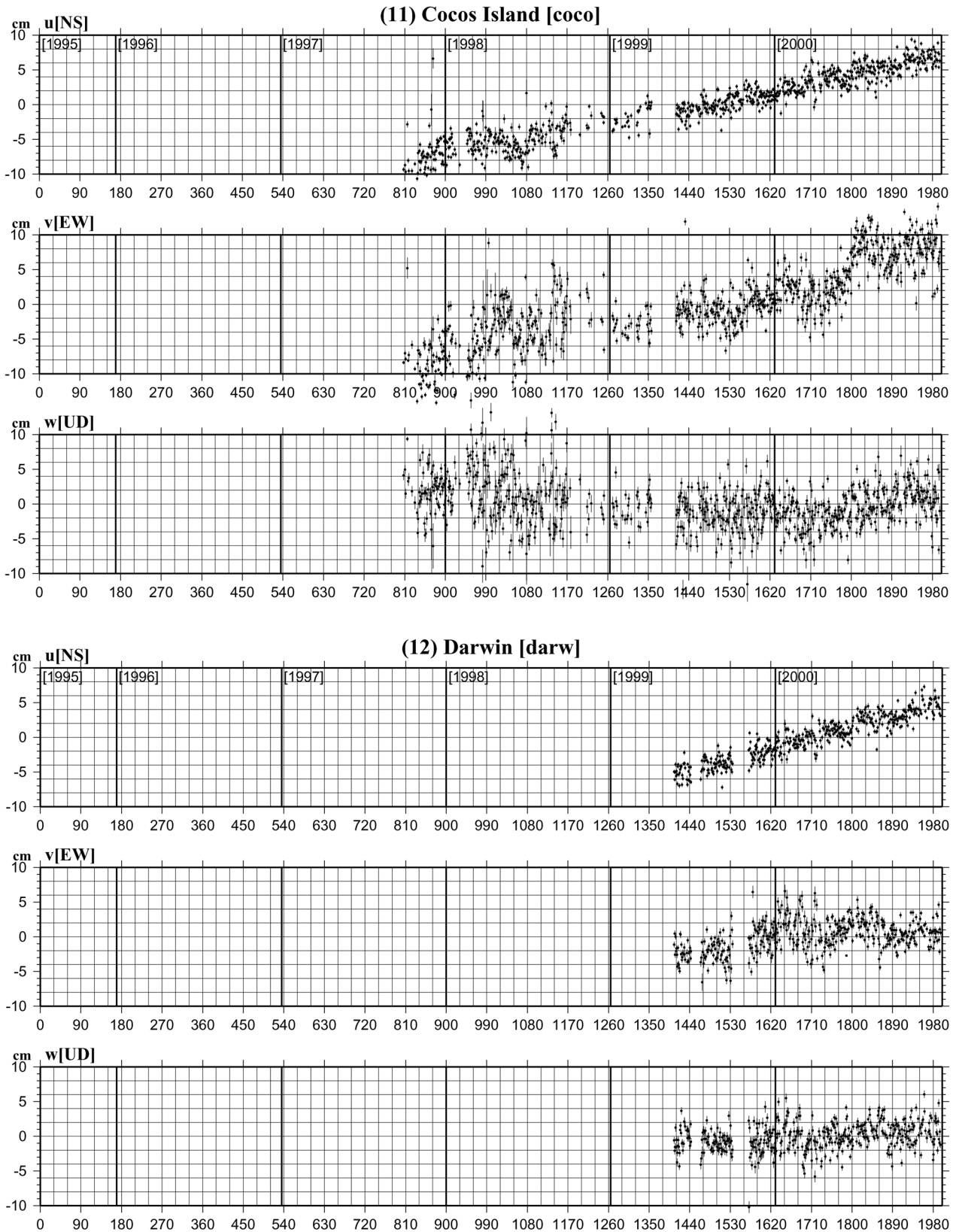


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

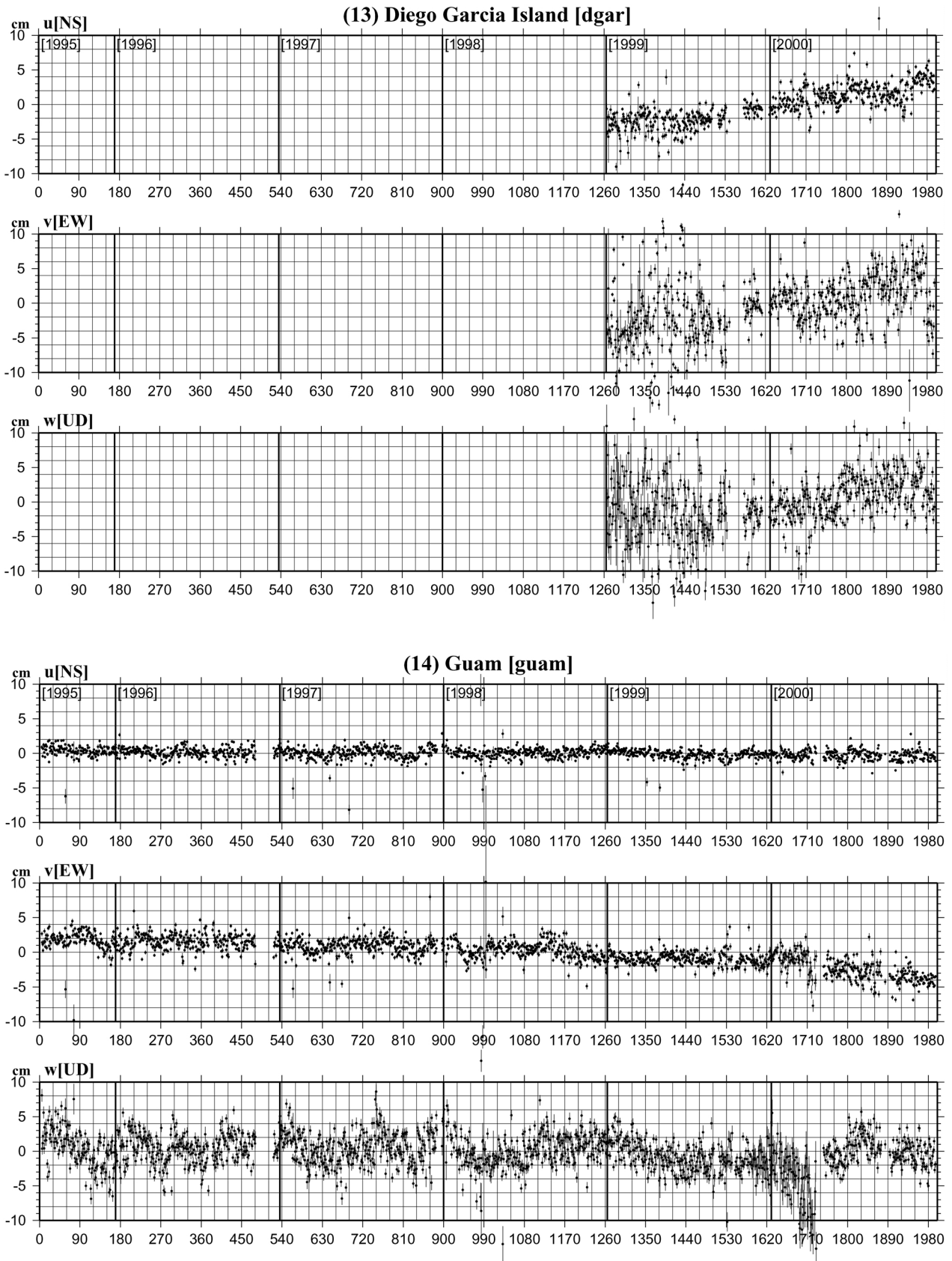


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

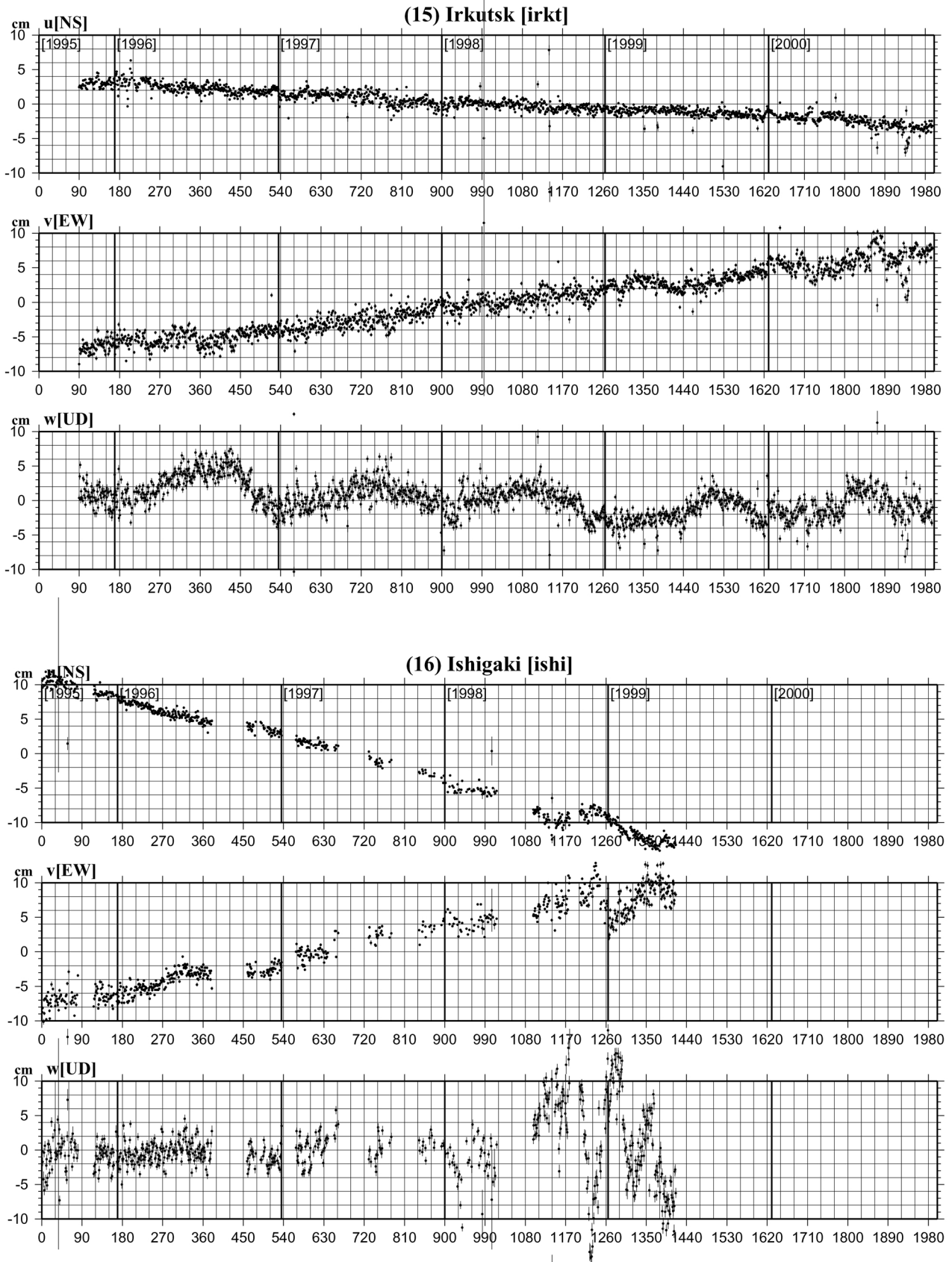


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

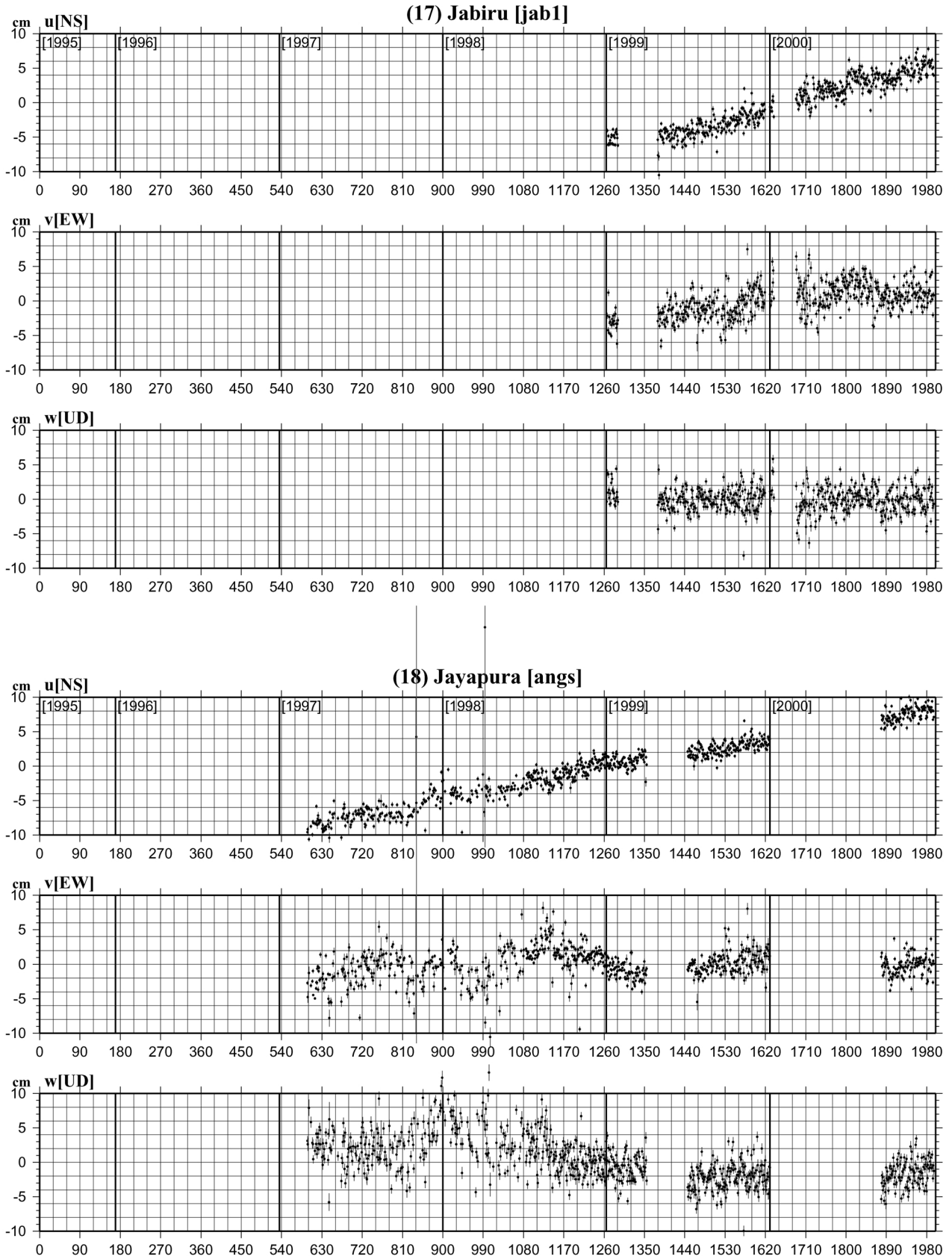


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

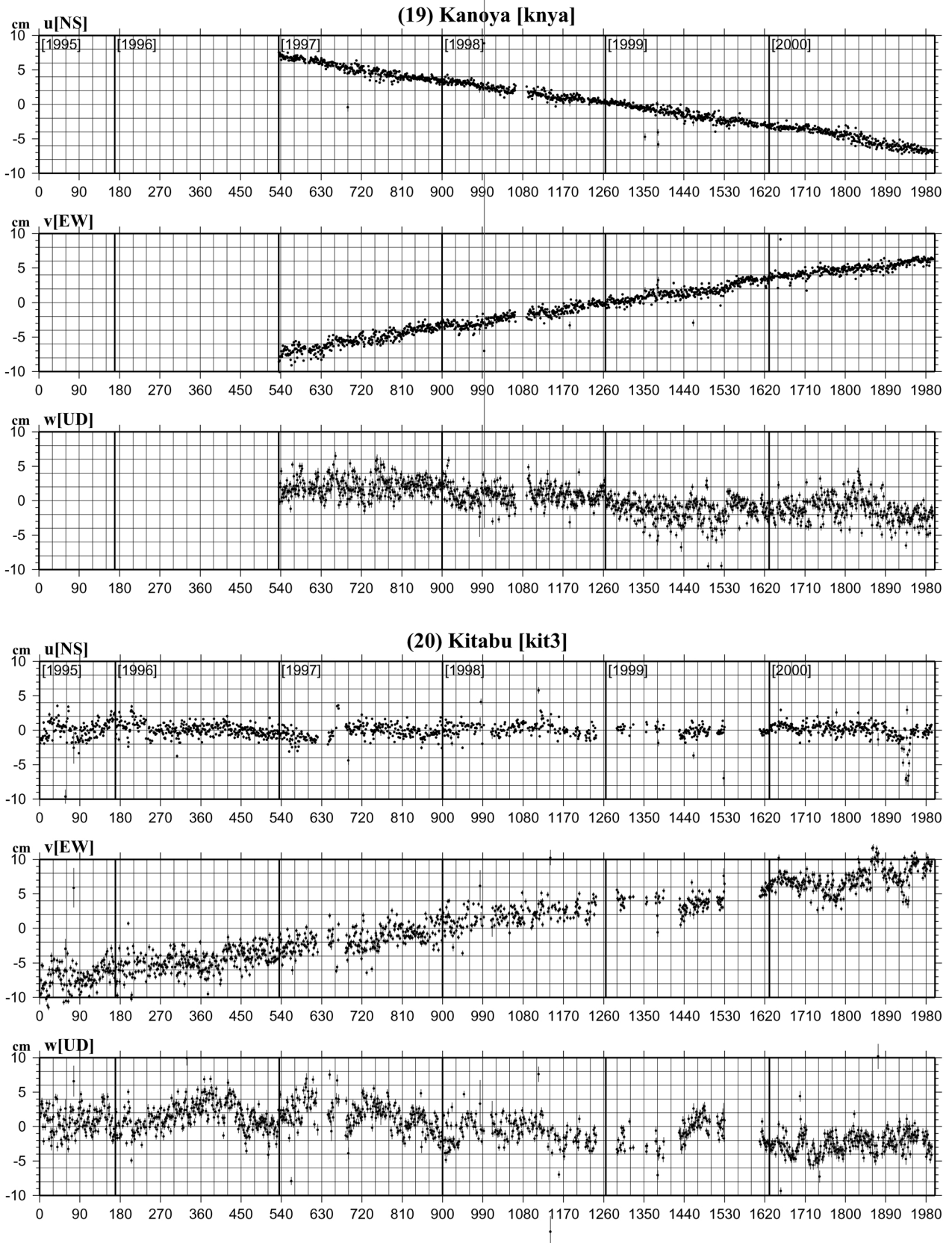


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

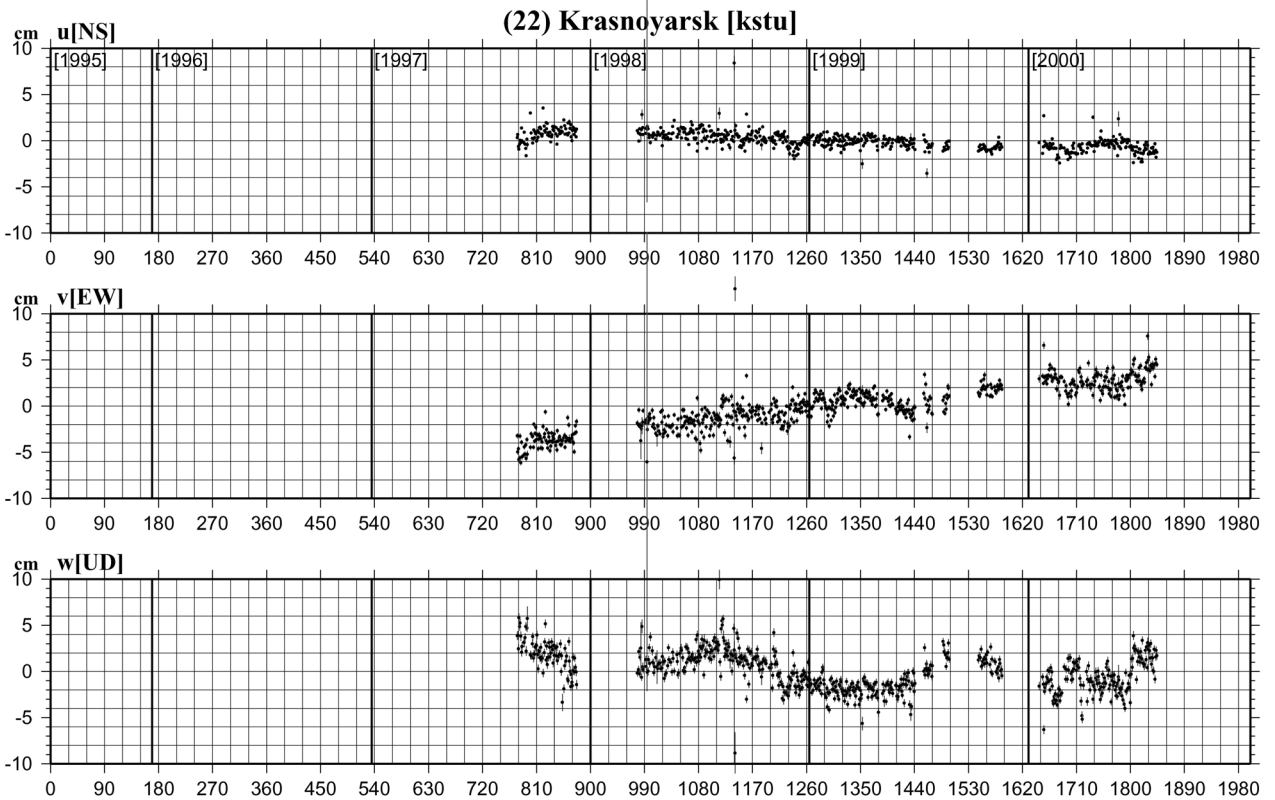
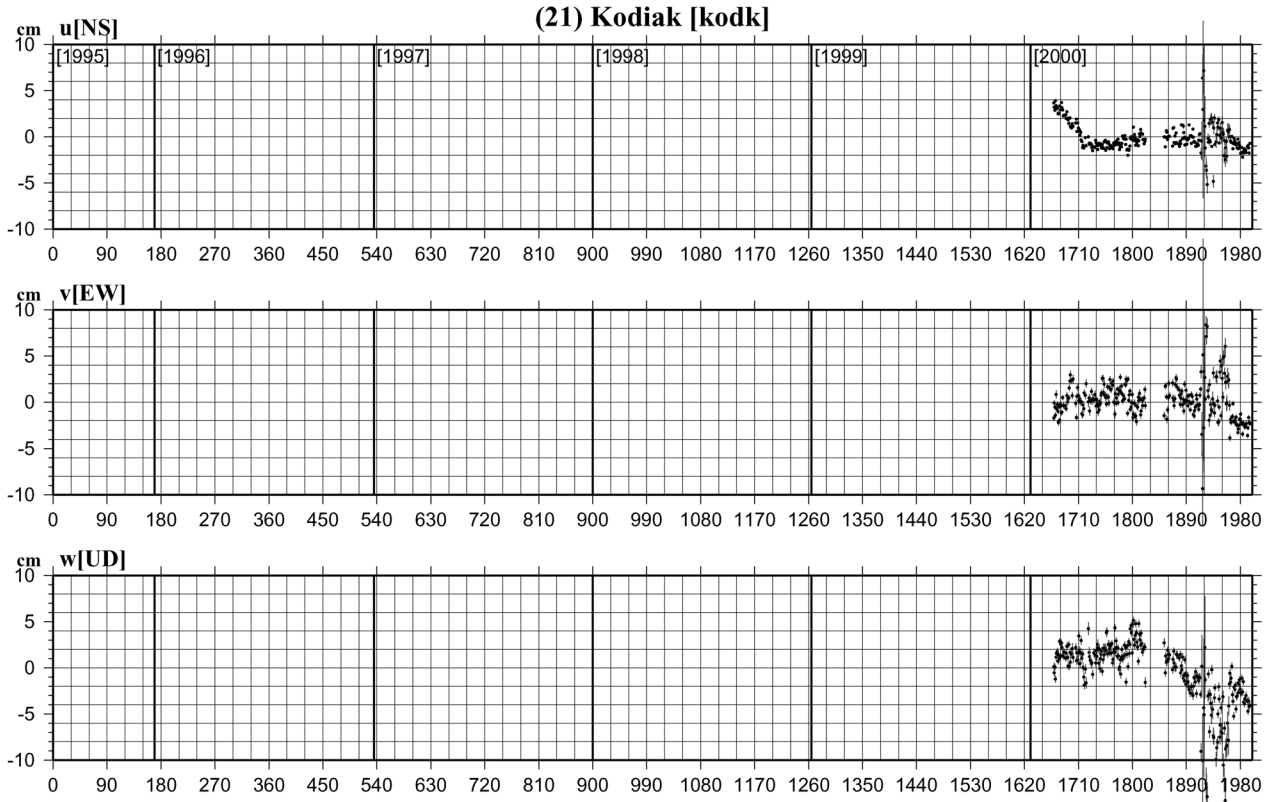


Fig. 2. (1)-59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

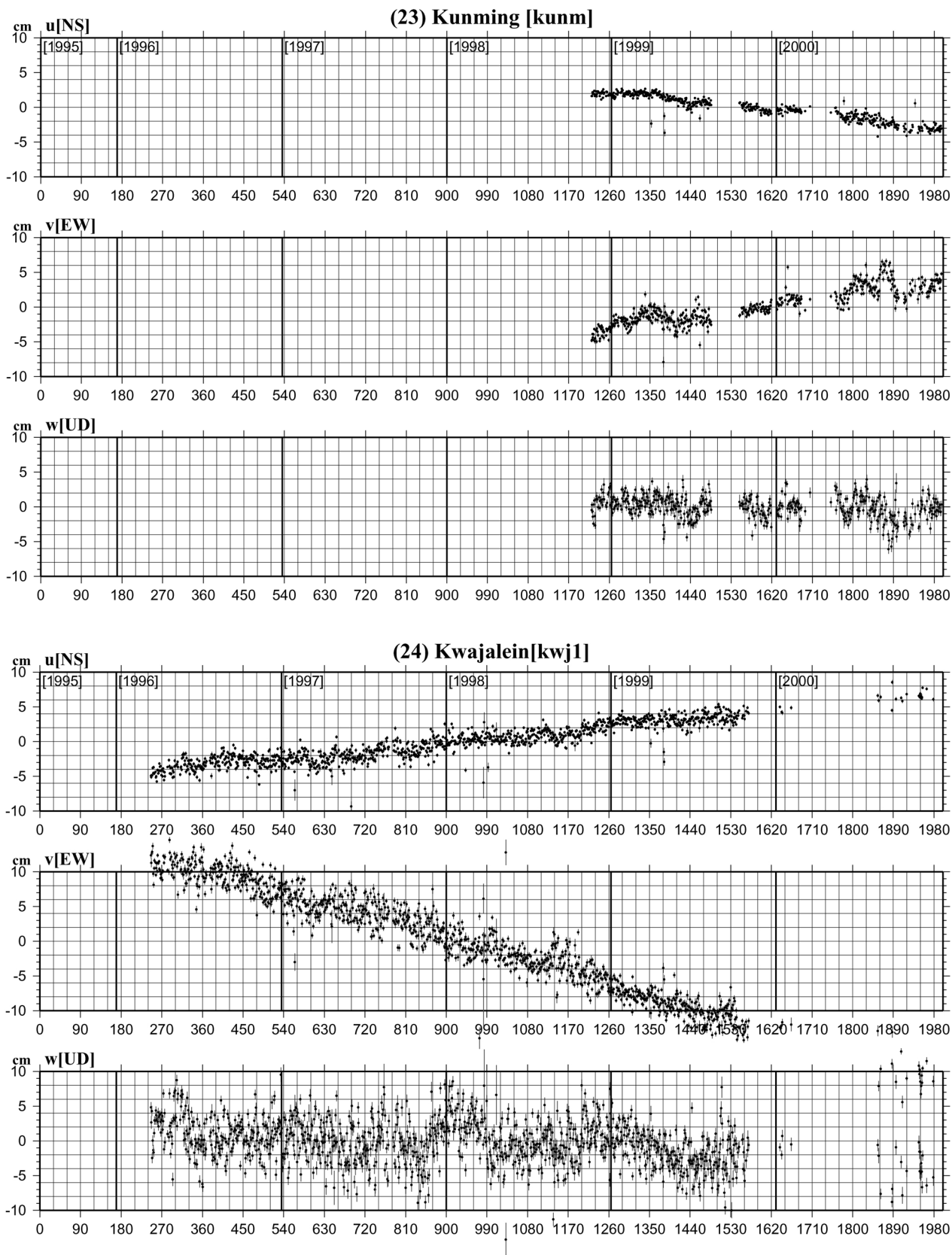


Fig. 2. (1)-59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

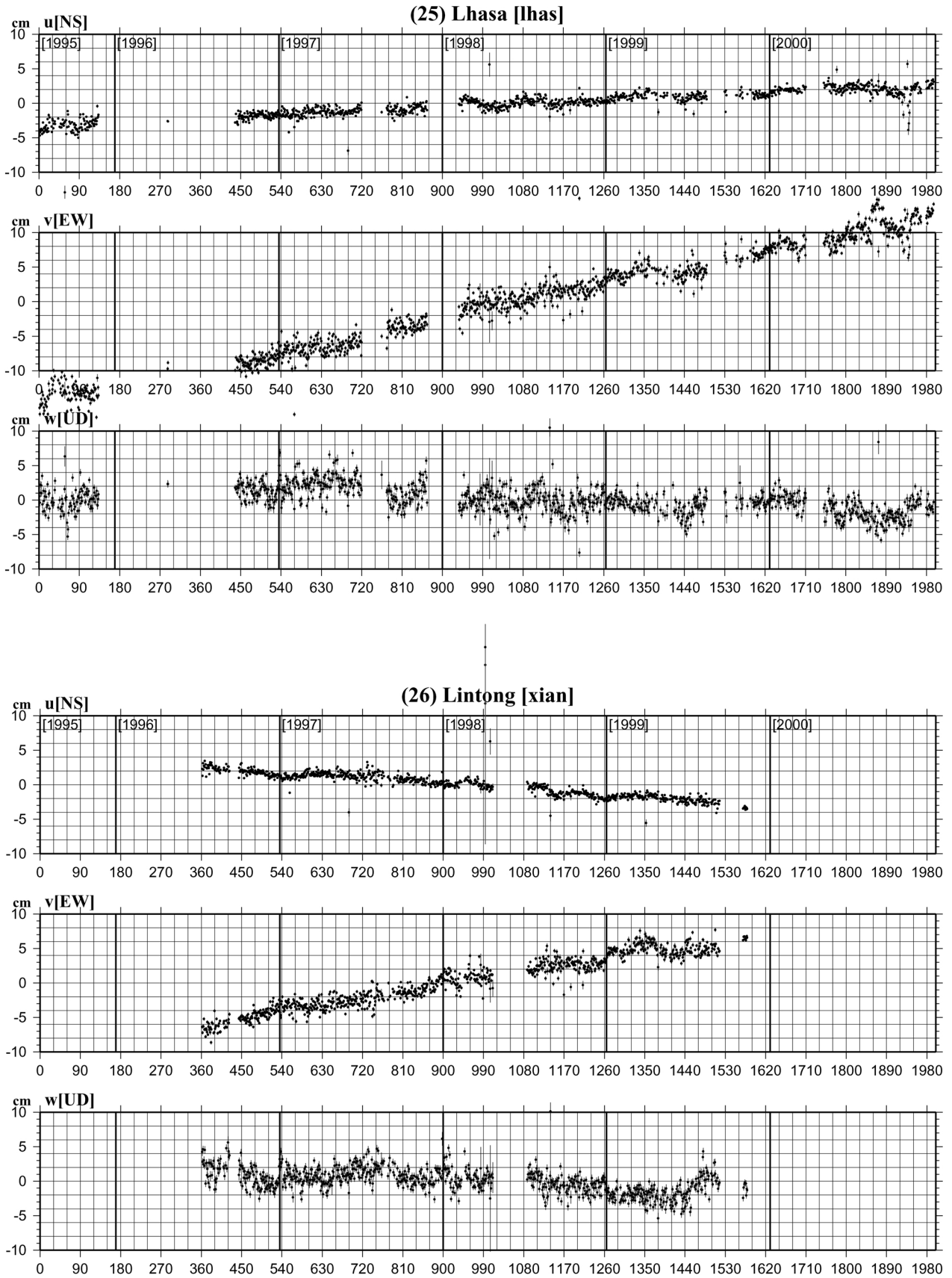


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

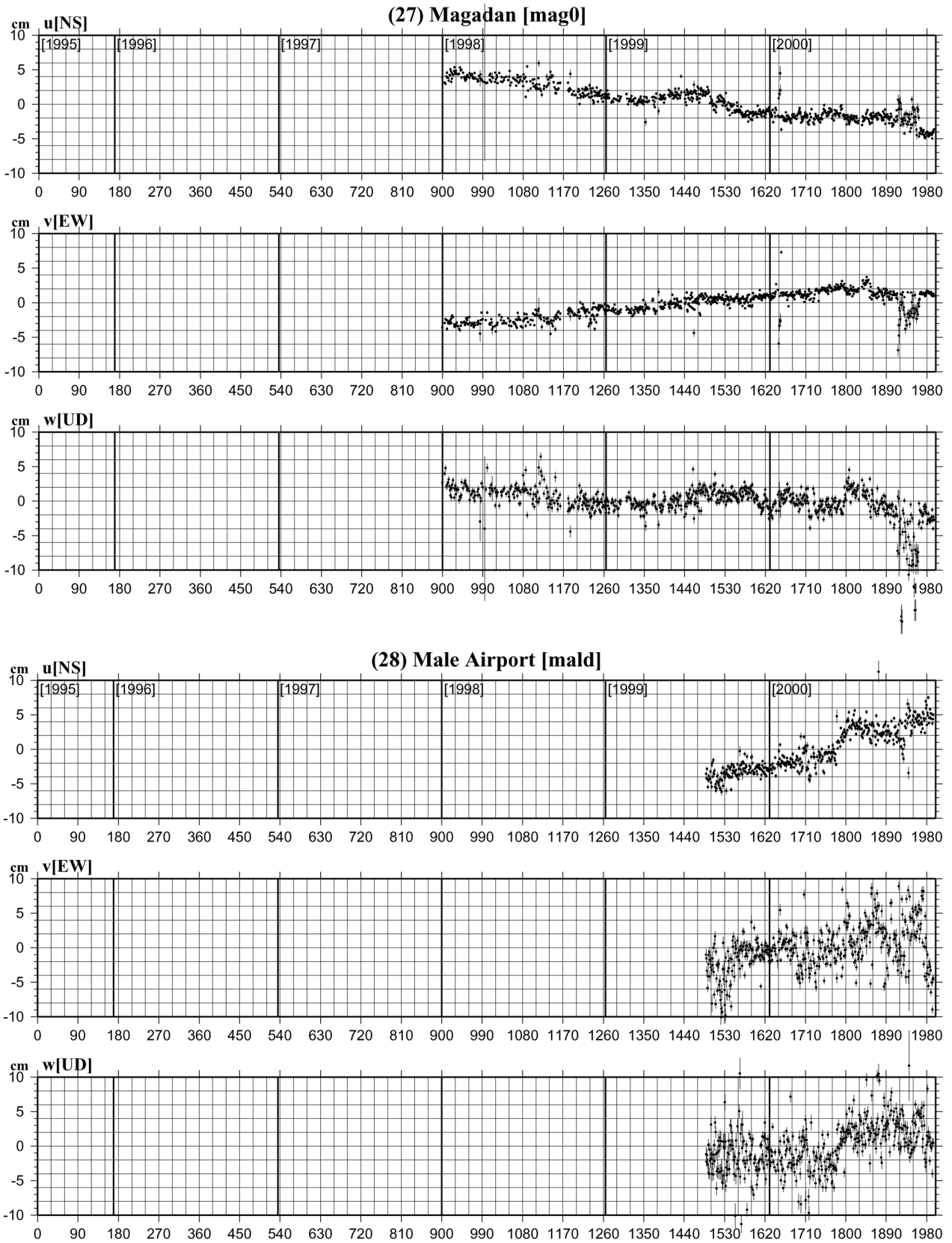


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

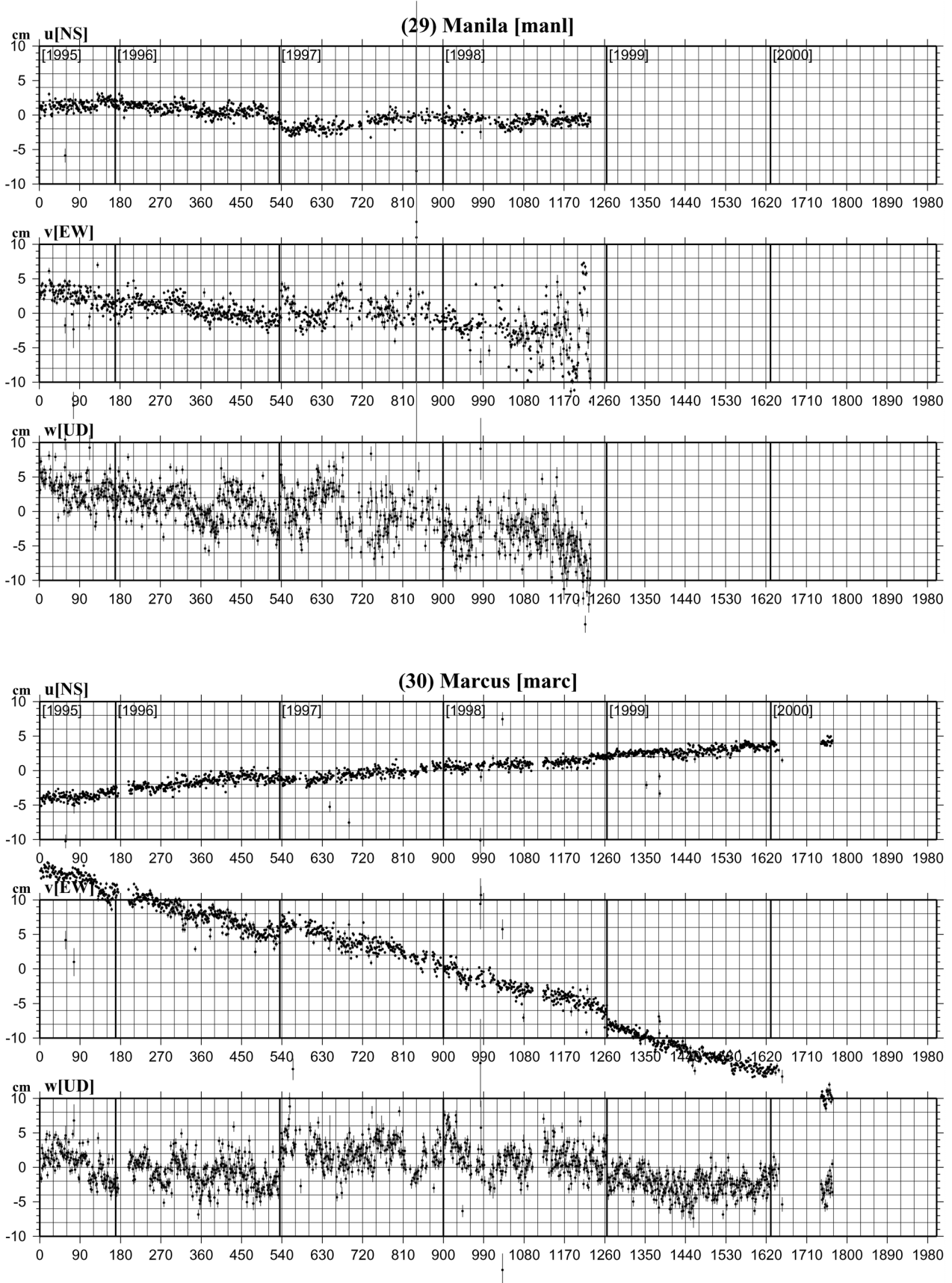


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

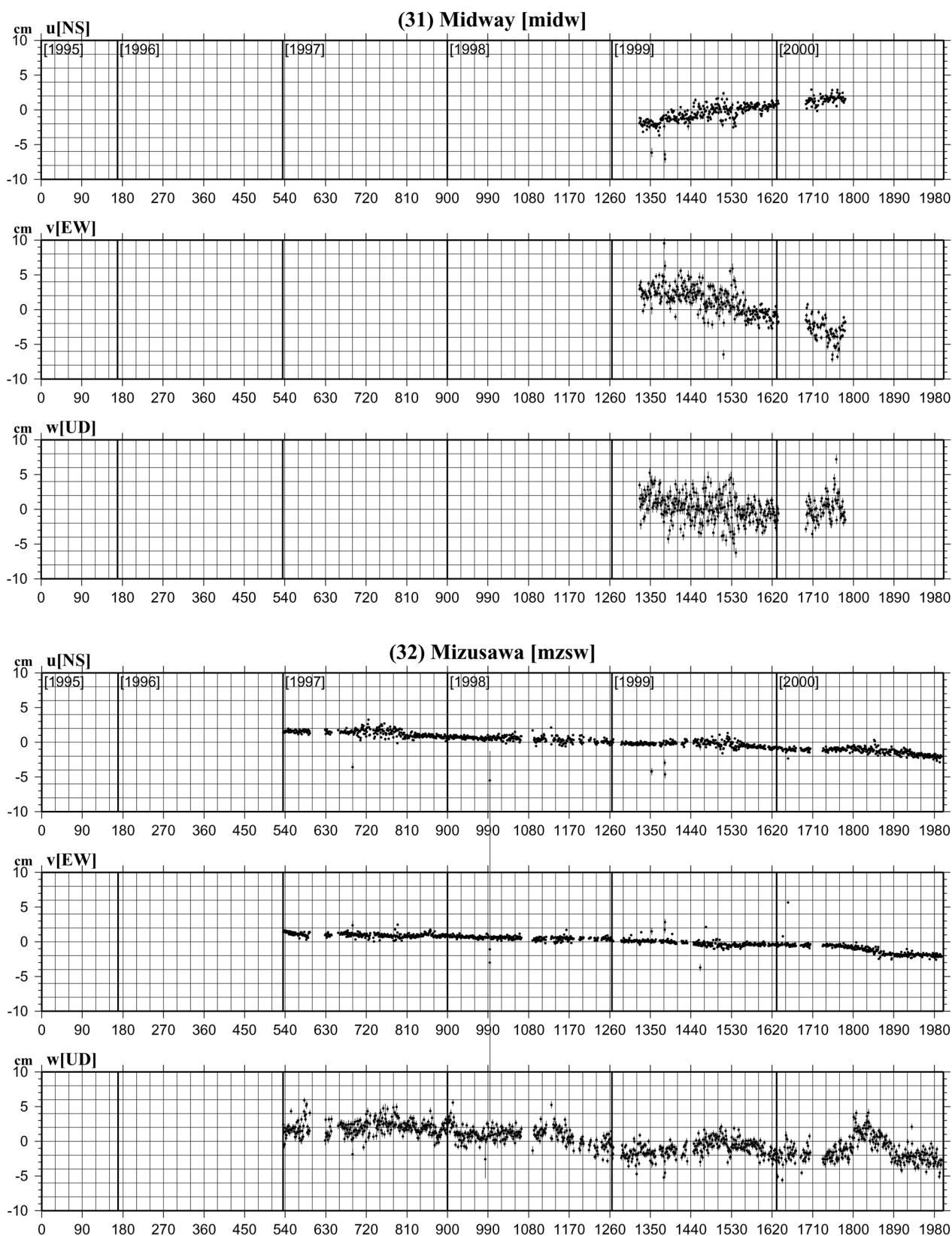


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

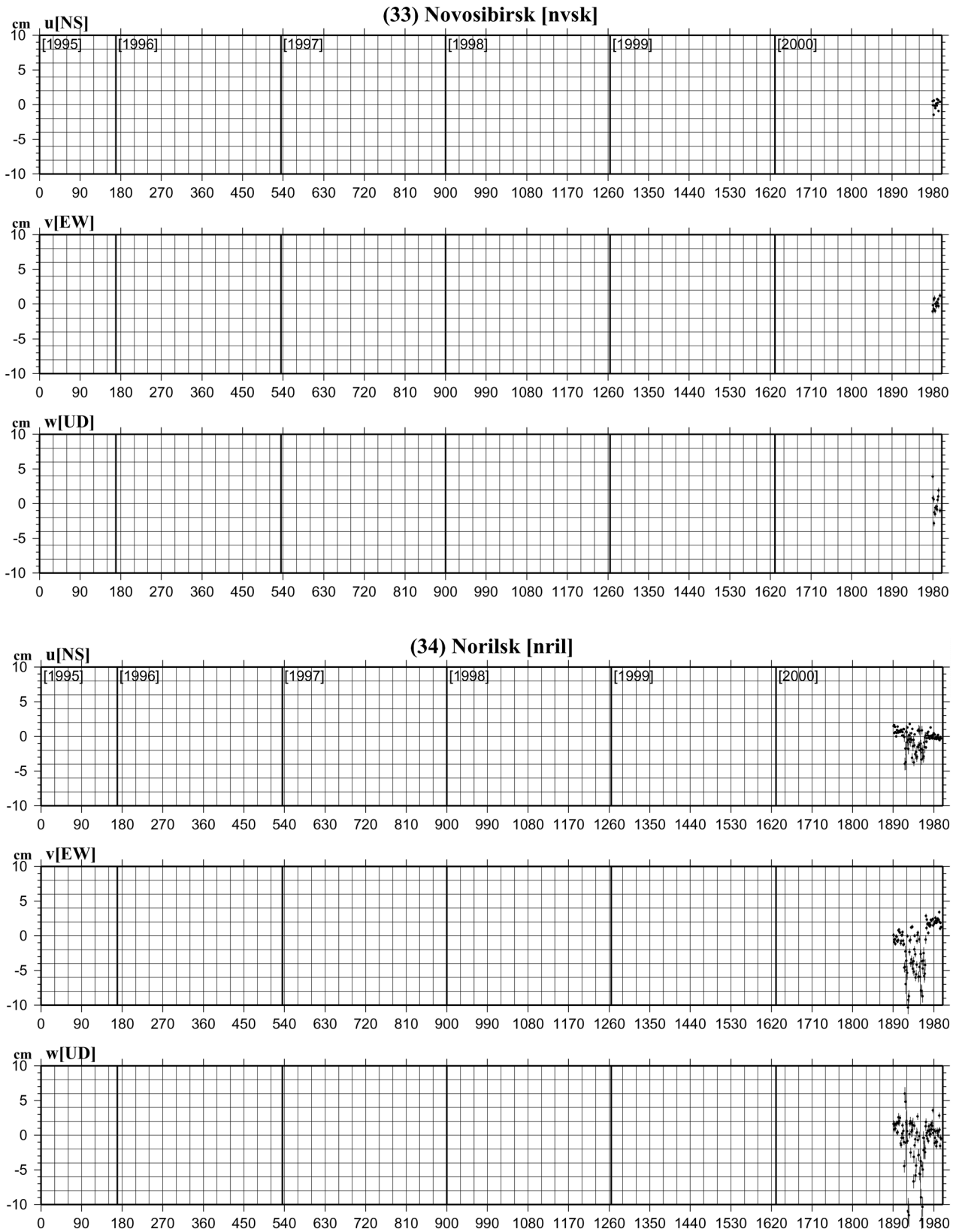


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

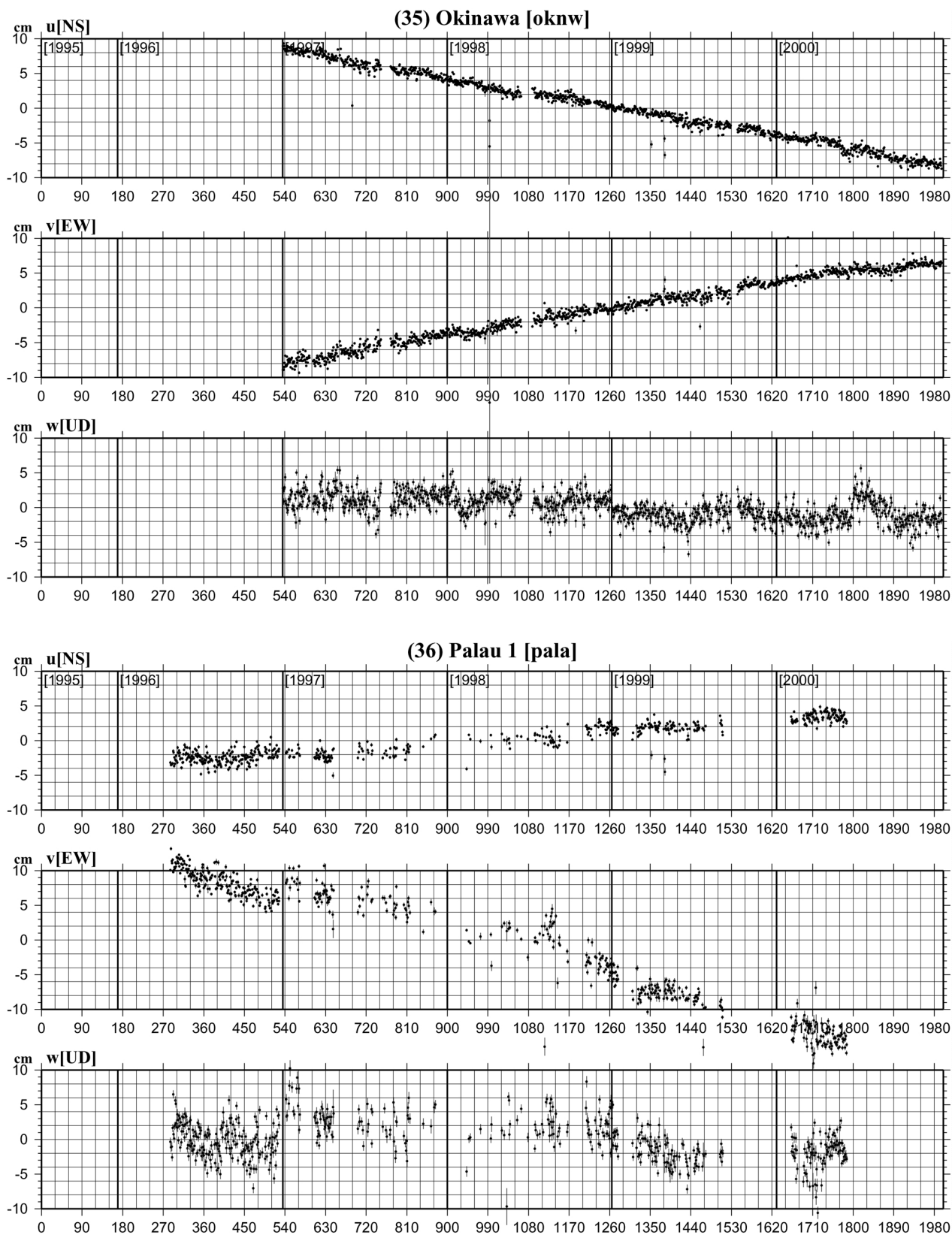


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

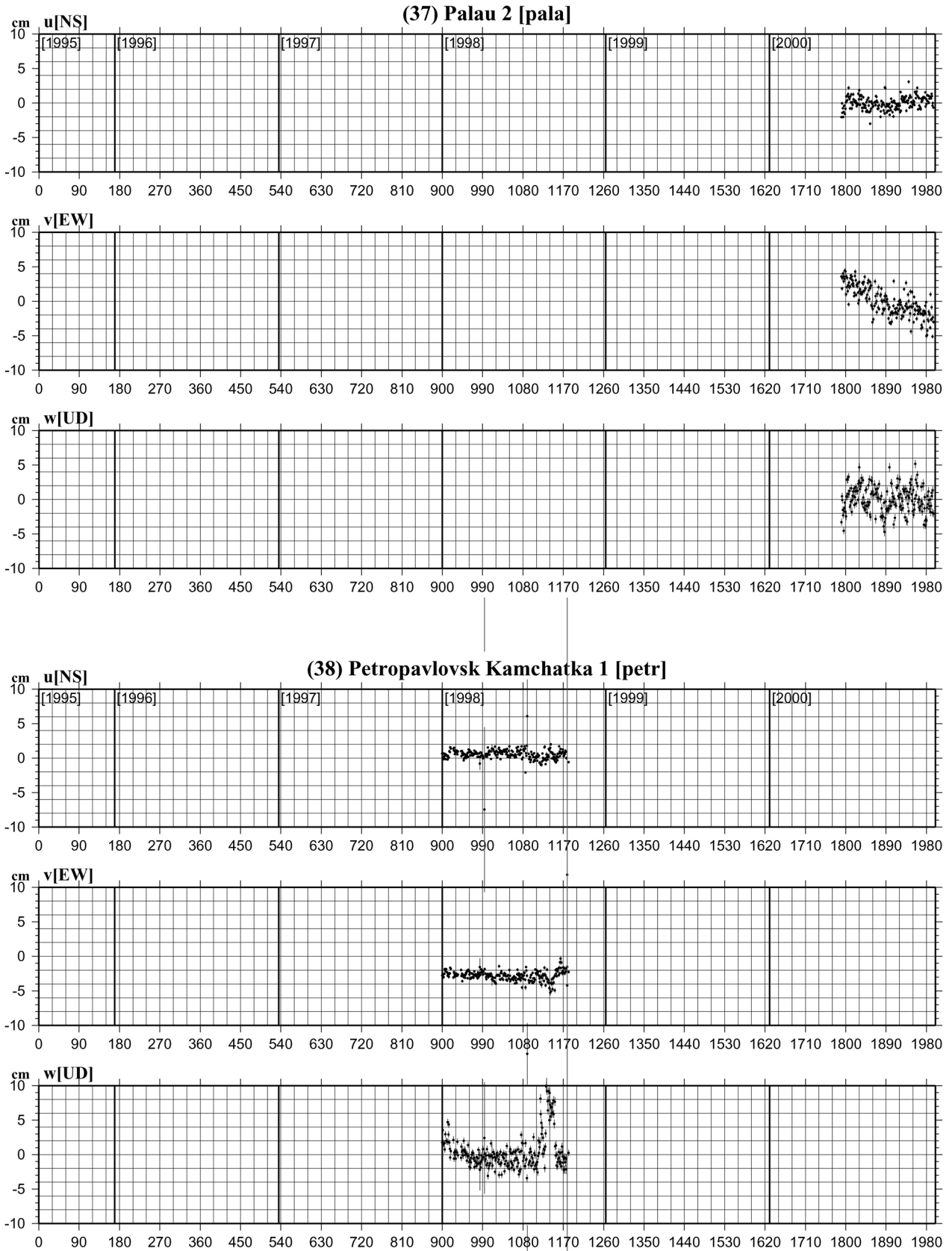


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

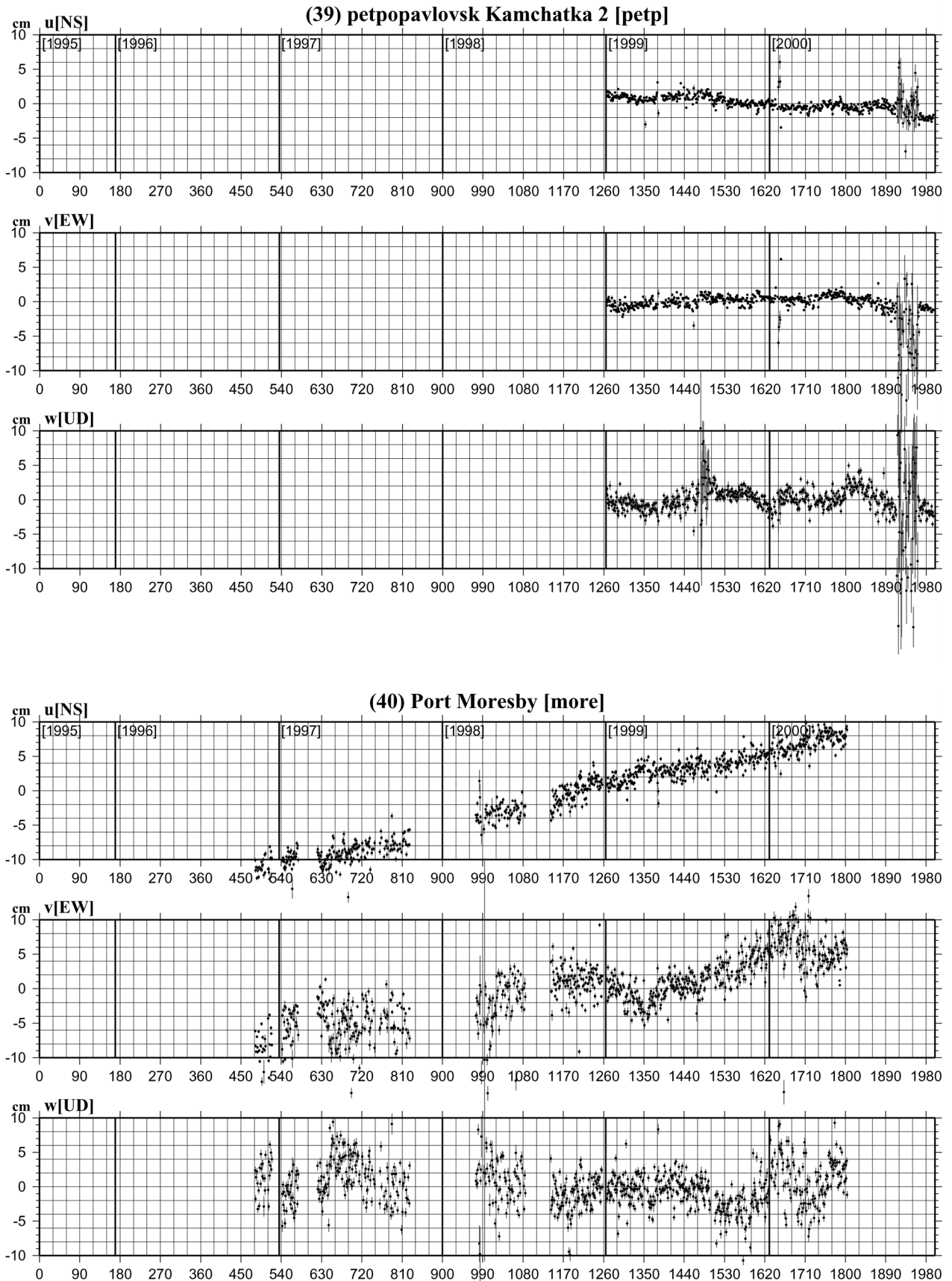


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

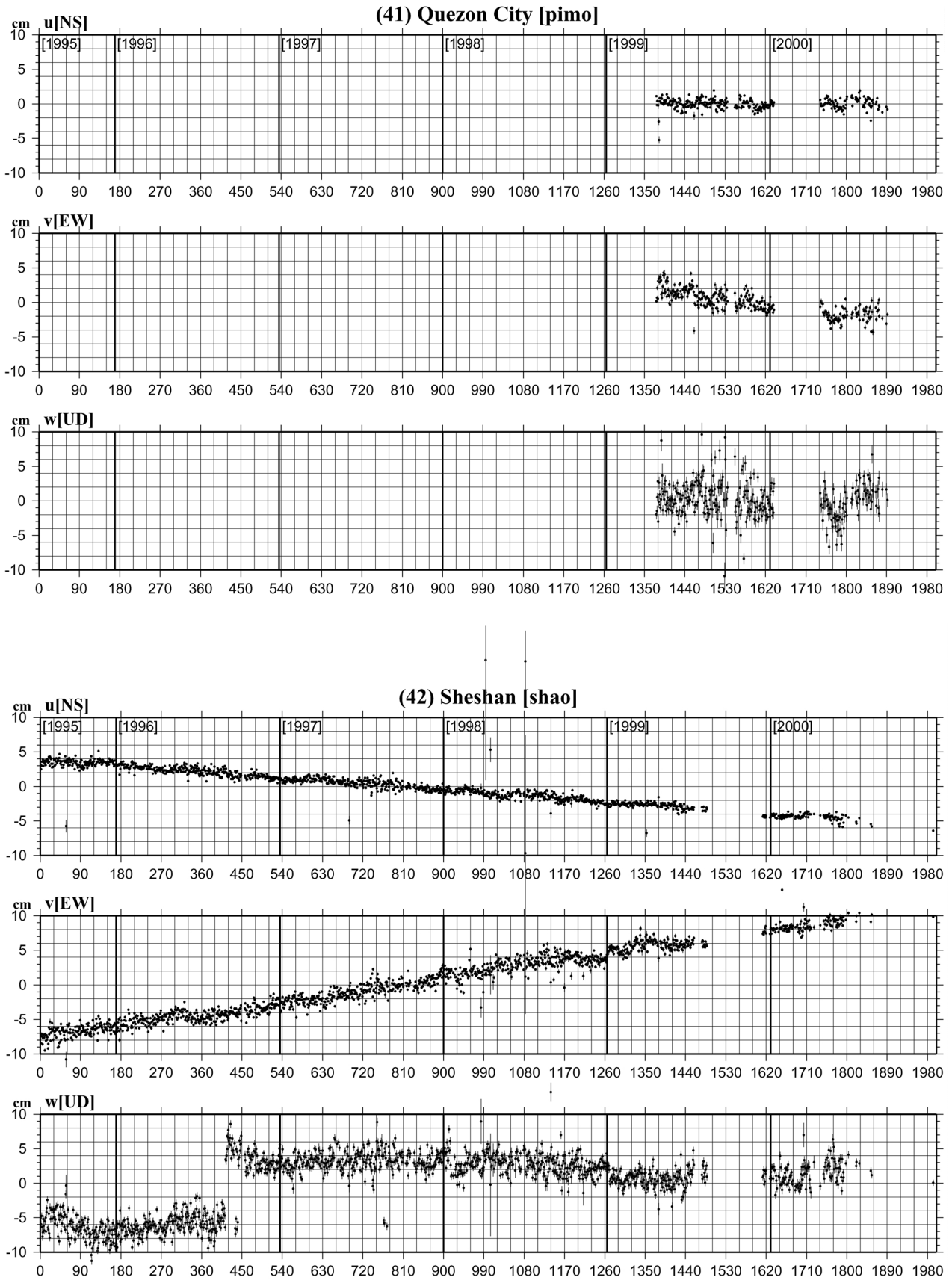


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

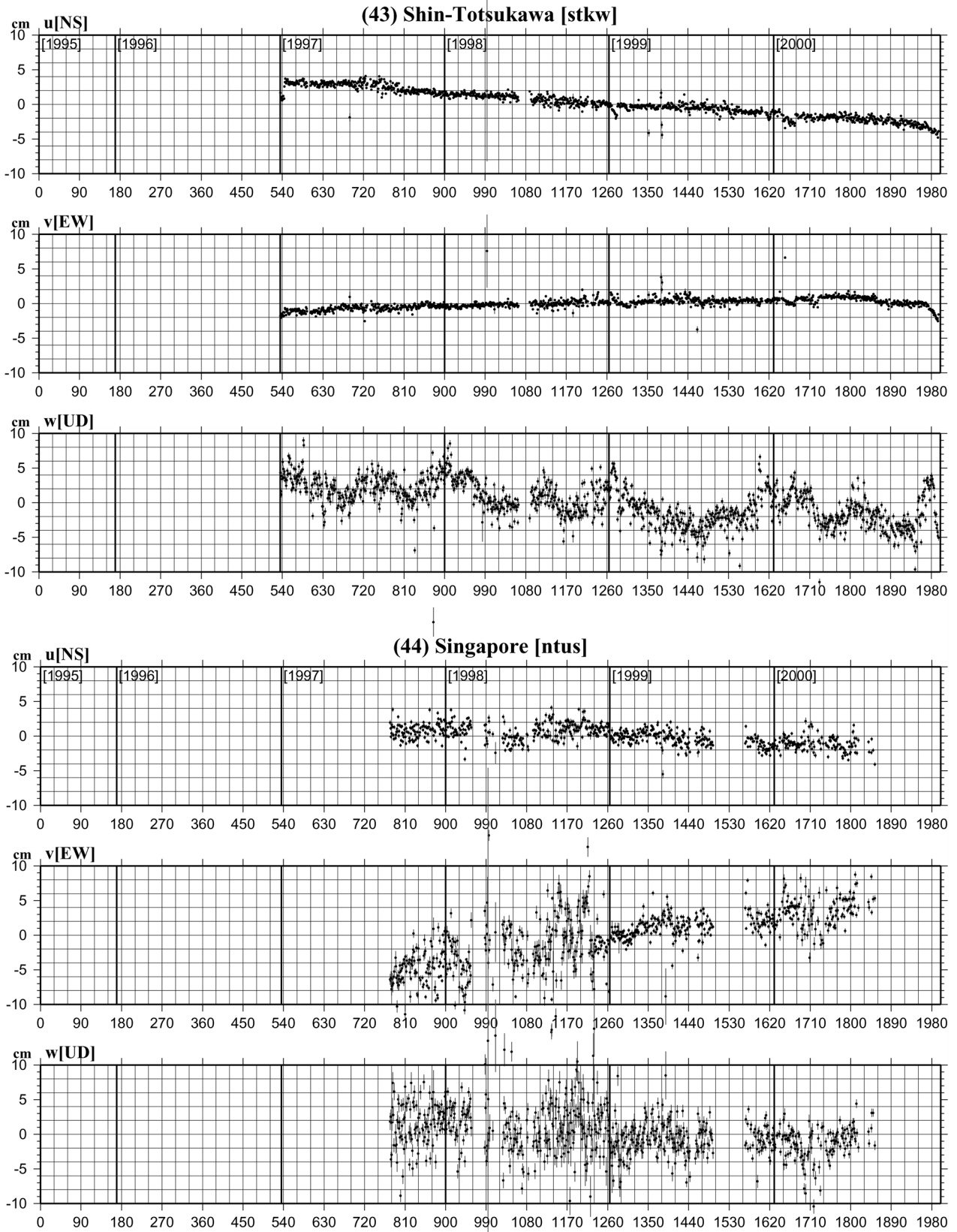


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

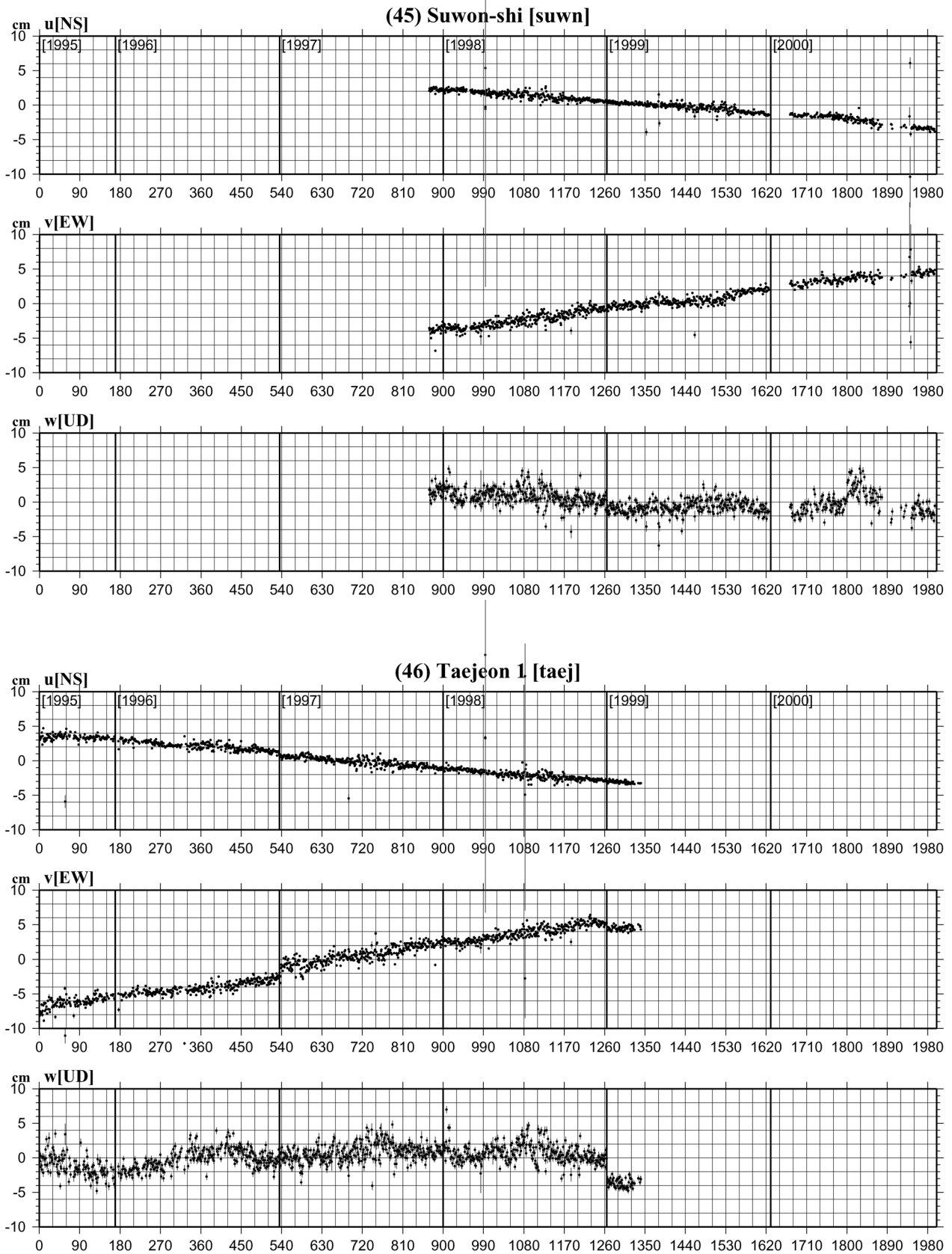


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

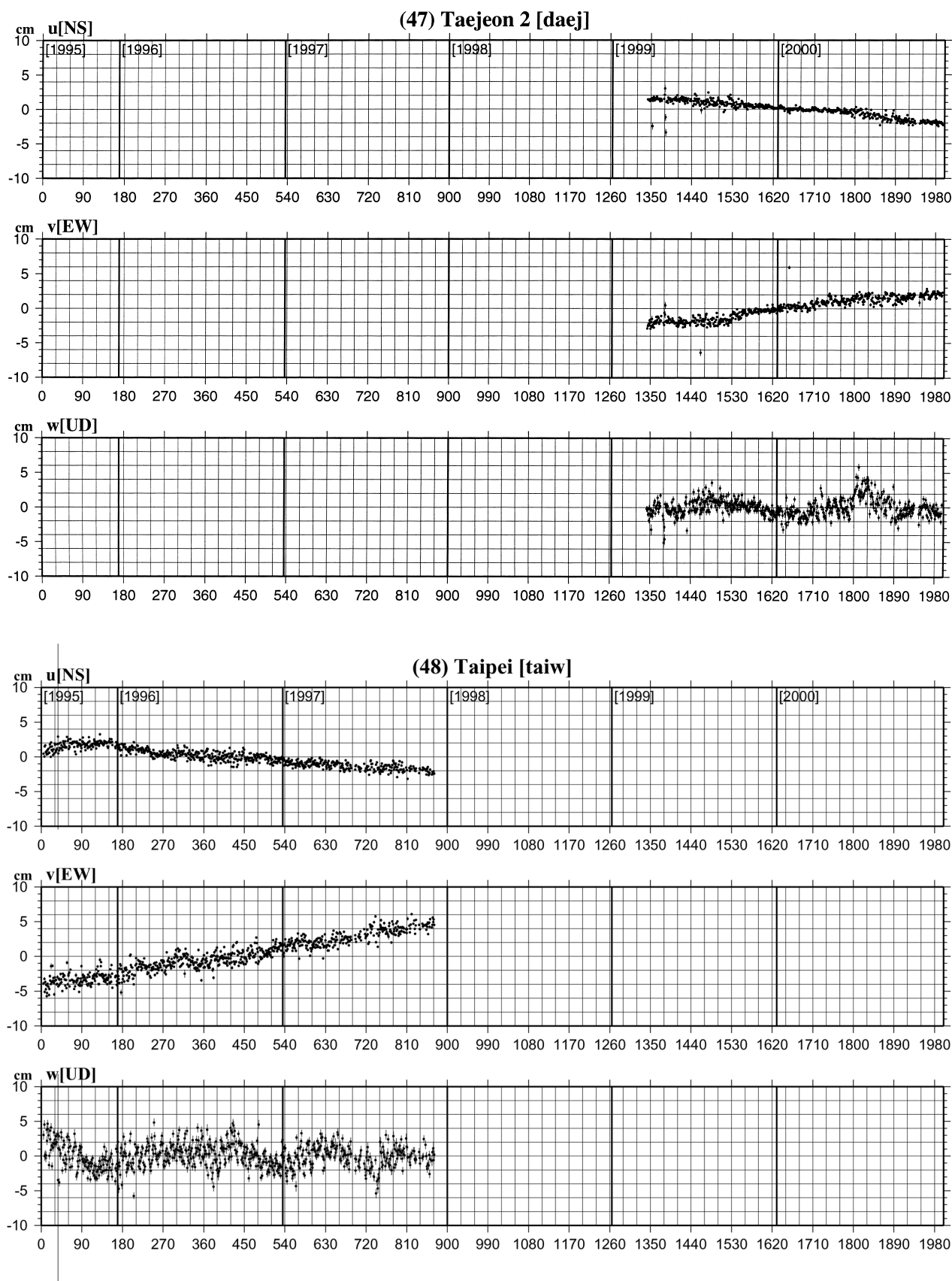


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

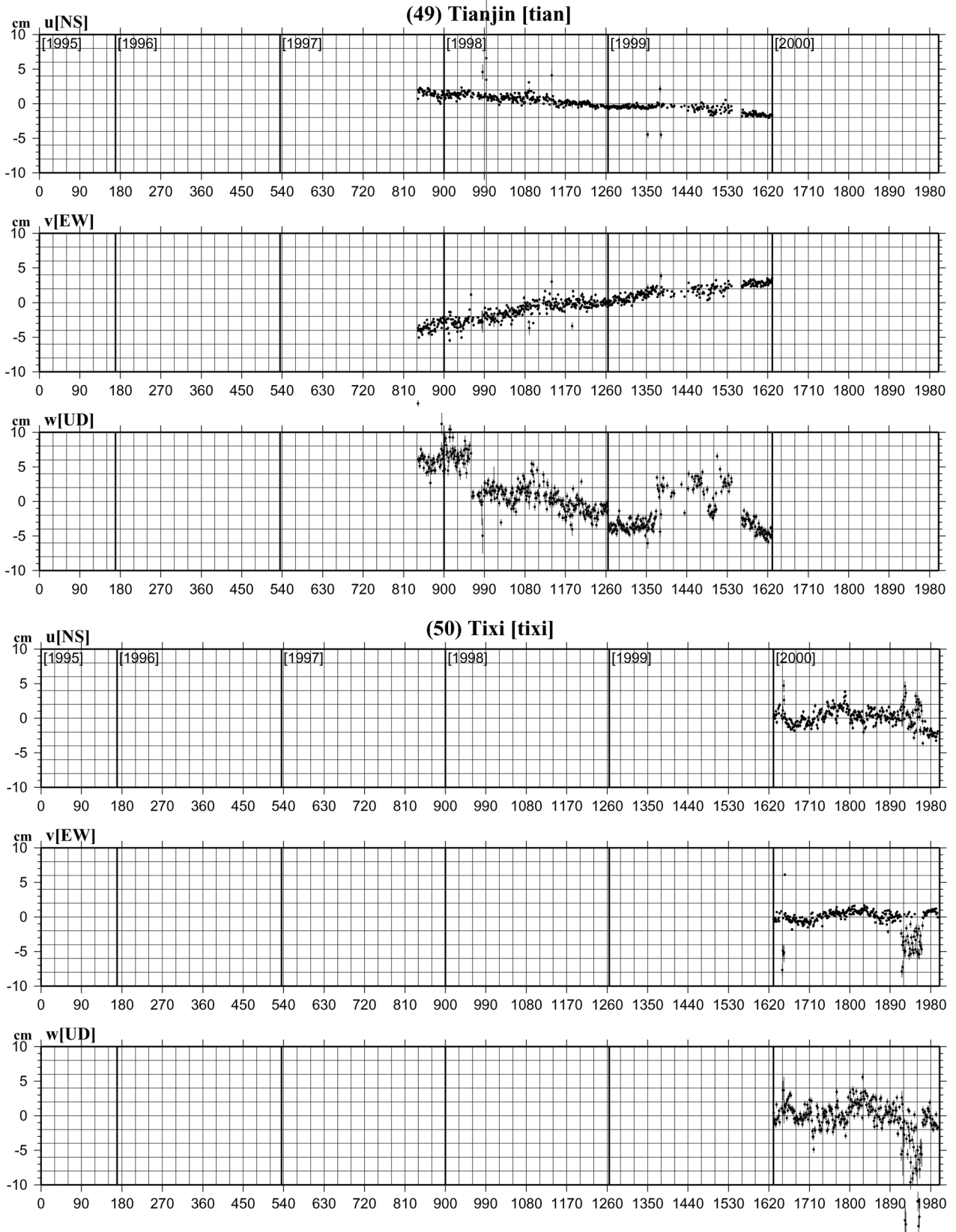


Fig. 2. (1)-59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

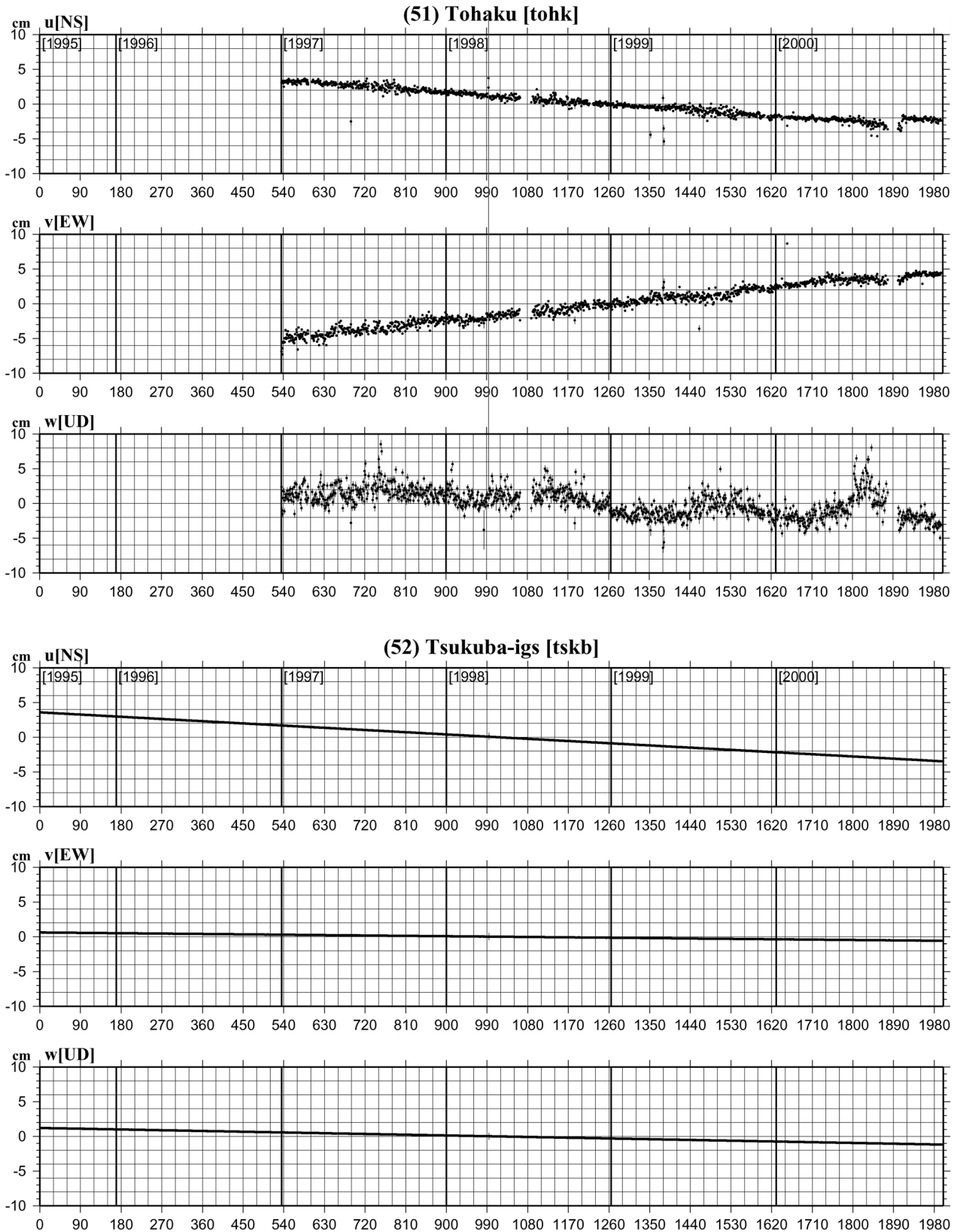


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

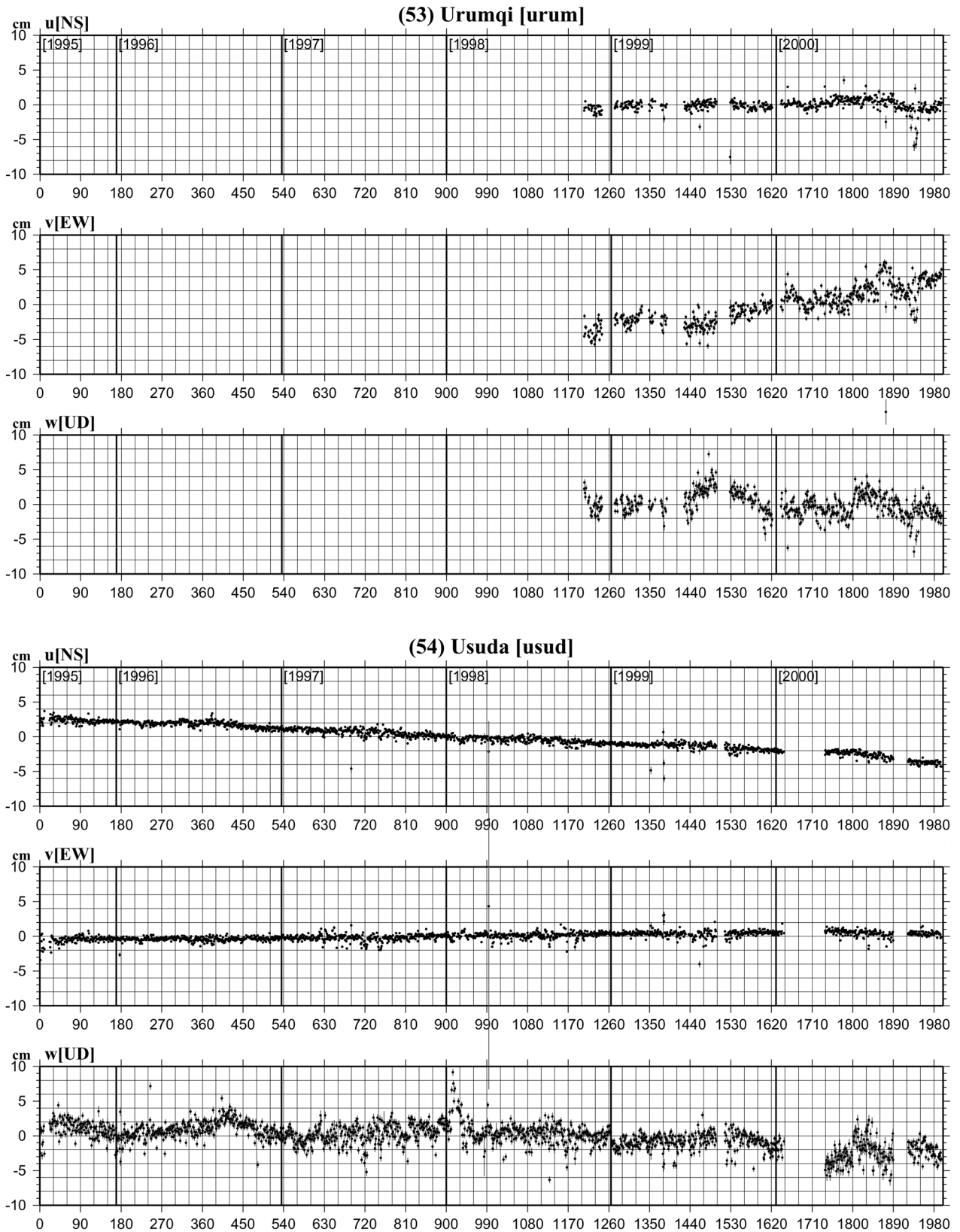


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

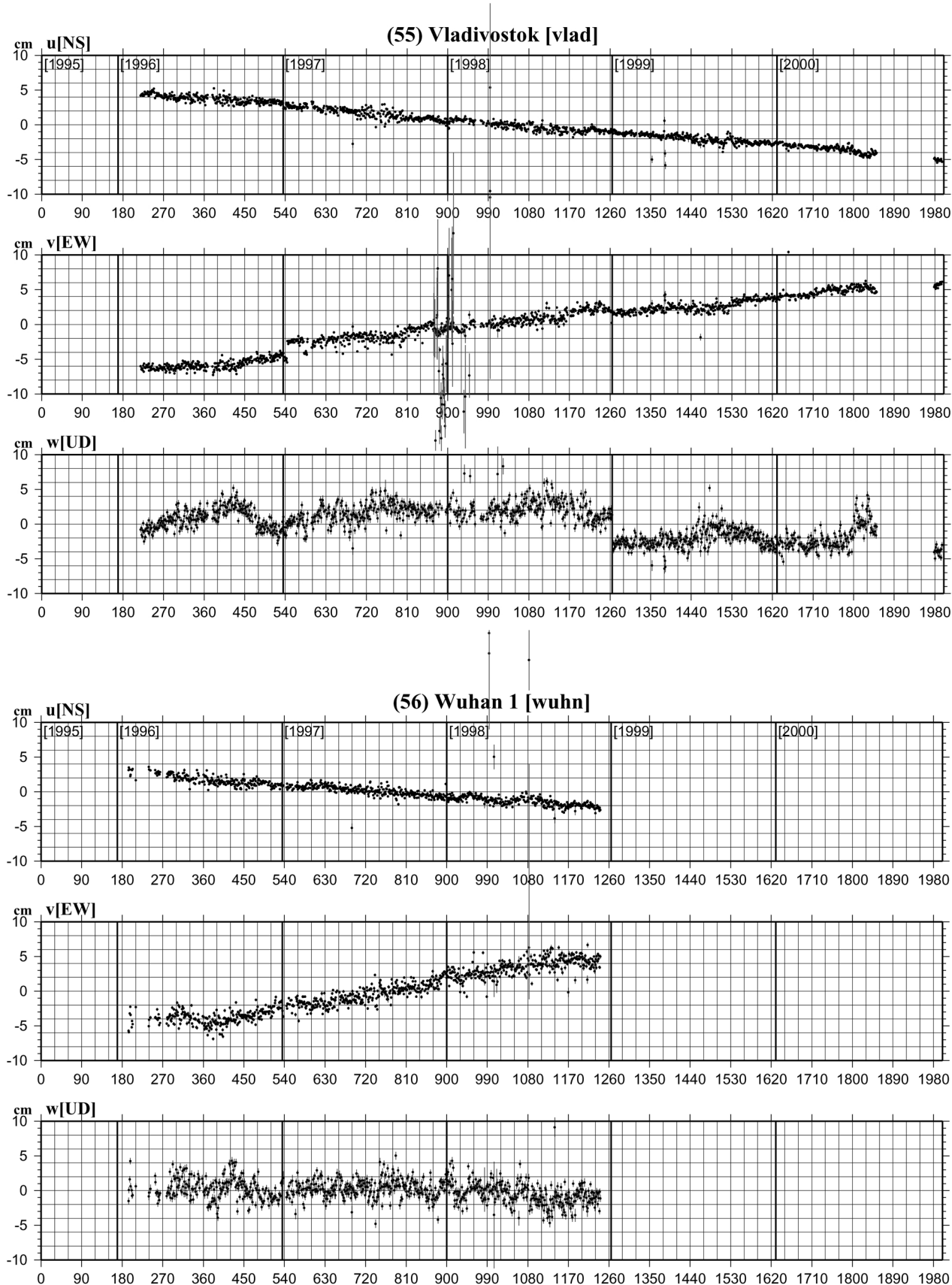


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

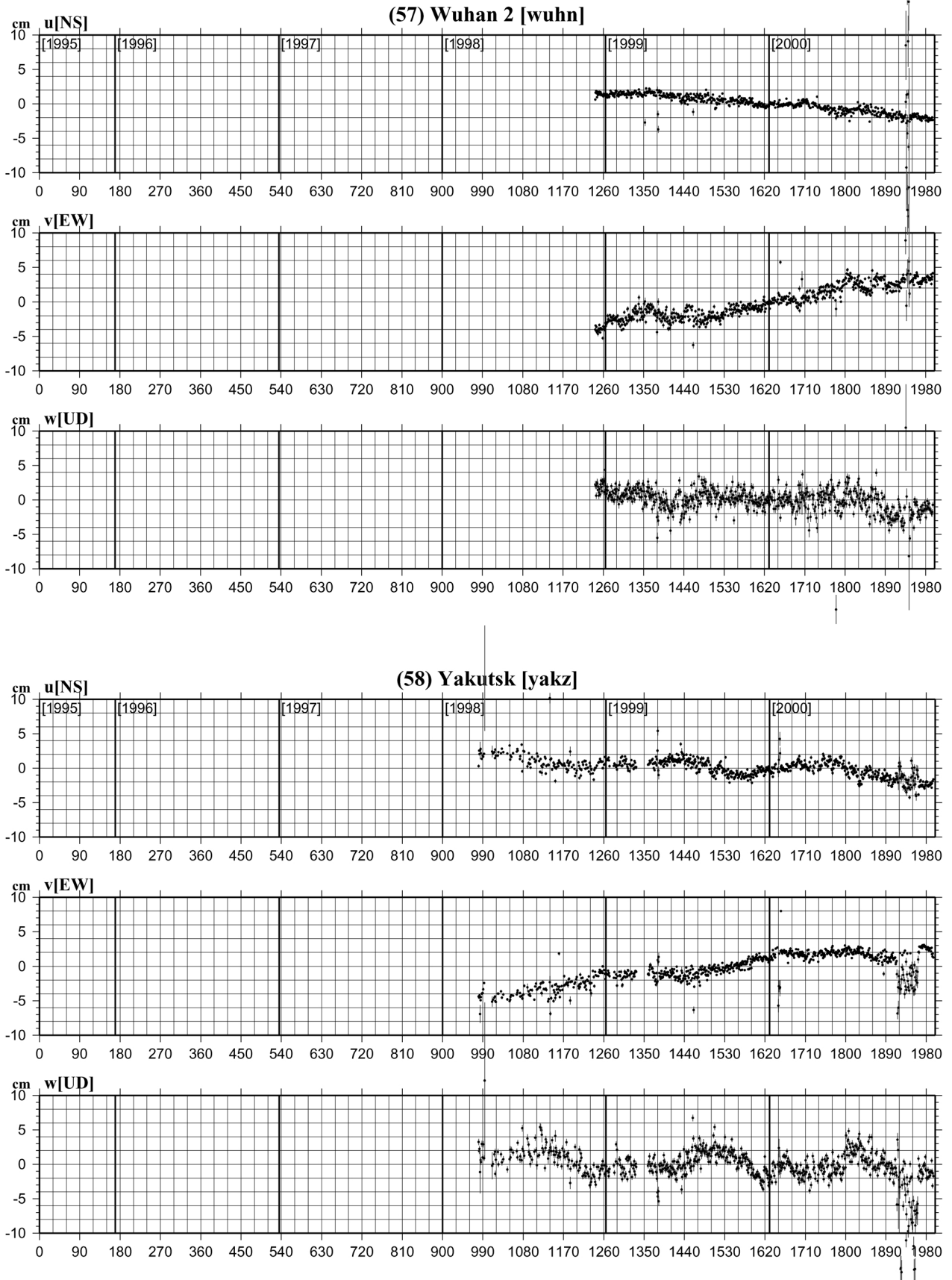


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

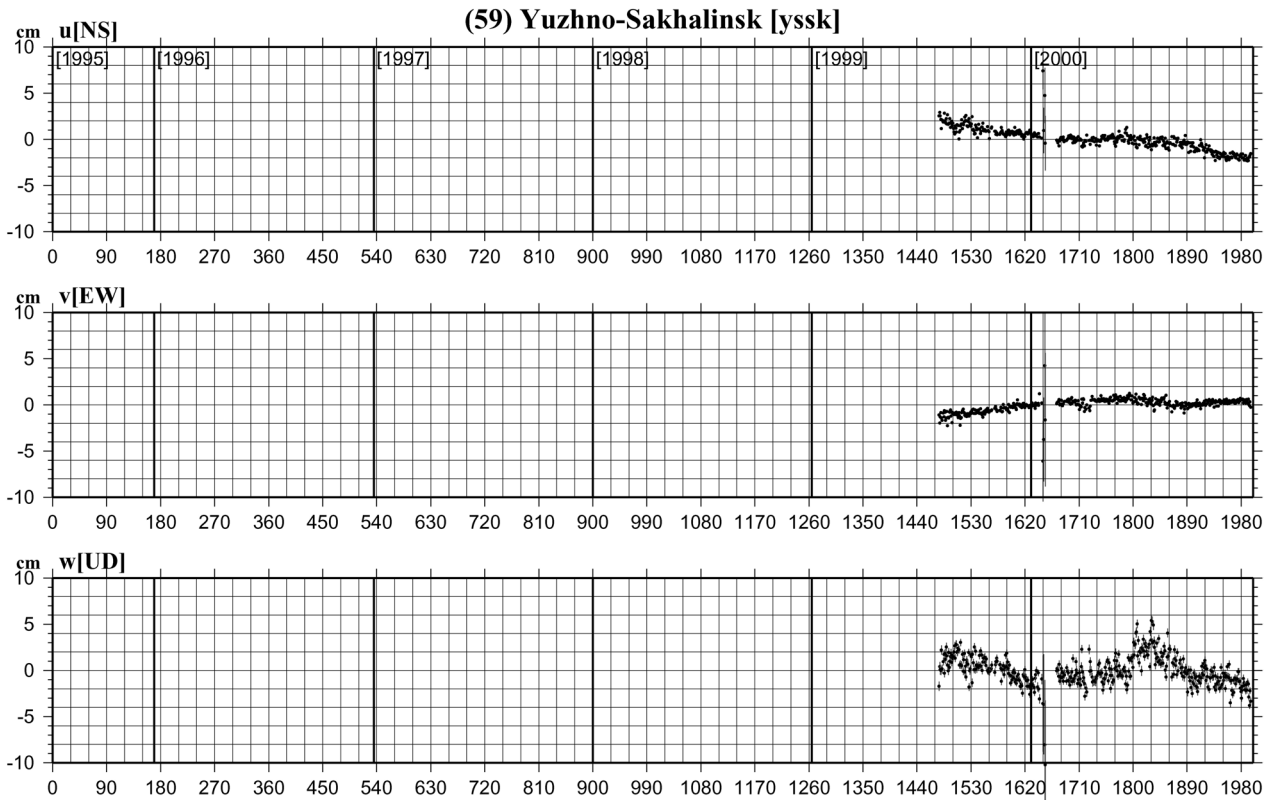


Fig. 2. (1)-(59): Time series of coordinates at GPS sites in ITRF97. (u) NS component: upward to north, (v) EW component: upward to east, and (w) vertical component: upward to upheaval, respectively.

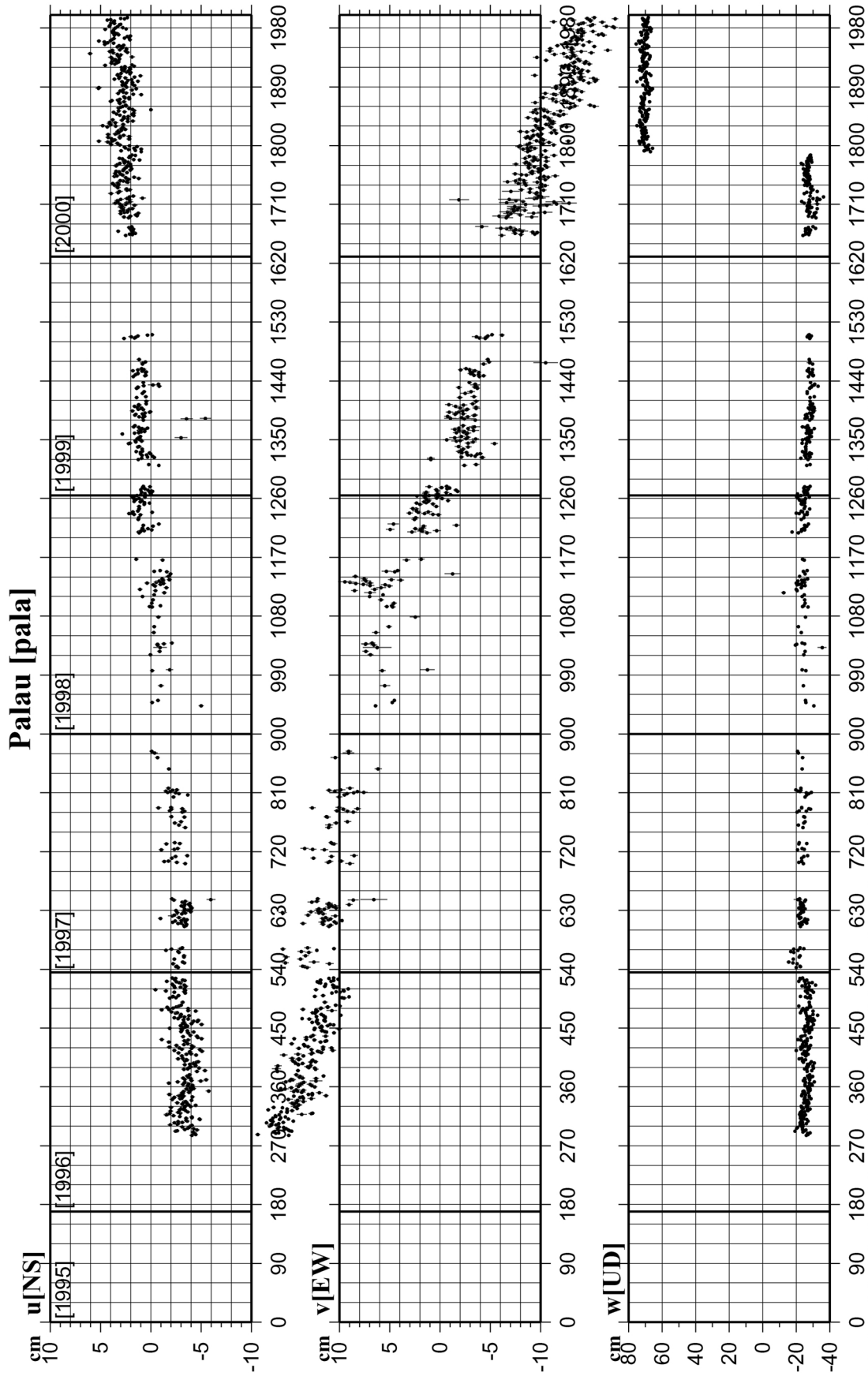


Fig. 3. Connected time series at Palau site. The pillar at the site was upraised in the beginning of June, 2000. Thus, vertical components have about 1m offset.

ご提供頂いた。図の作成には GMT V3.3.2 を使用した (Wessel and Smith, 1991)。地震研究所瀬野徹三教授及び同所綿田辰吾助手には原稿を査読していただいた。ここに謝意を表する。

文 献

- Argus, D.F., and R.G. Gordon, 1991, No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 2039-2042.
- Boucher, C., Z. Altamimi, and P. Sillard, 1999, The ITRF97 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97), Intern. Earth Rotation Serv. Tech Note 27, Observatoire de Paris, Paris.
- Heflin, M., W. Bertiger, G. Blewitt, A. Freedman, K. Hurst, S. Lichten, U. Lindqwister, Y. Vigue, F. Webb, T. Yunck, and J. Zumberge, 1992, Global geodesy using GPS without fiducial sites, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 131-134.
- Heki, K., 1996, Horizontal and vertical crustal movements from three-dimensional very long baseline interferometry kinematic reference frame: Implication for the reversal timescale revision, *J. Geophys. Res.*, **101**, 3187-3198.
- Kato, T., Y. Kotake, S. Nakao, J. Beavan, K. Hirahara, M. Okada, M. Hoshiba, O. Kamigaichi, R.B. Feir, P.H. Park, M.D. Gerasimenko, and M. Kasahara, 1998, Initial results from WING, the continuous GPS network in the western Pacific area, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 369-372.
- Kato, T., J. Beavan, T. Matsushima, Y. Kotake, J.T. Camacho, and S. Nakao, 2003, Geodetic evidence of back-arc spreading in the Mariana Trough, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi : 10.1029/2002 GL 016757.
- 小竹美子・加藤照之・中尾 茂・平原和朗・岡田正實・上垣内修・干場充之・笠原稔・J. Beavan・R.B. Feir, M.D. Gerasimenko, and P.H. Park, 1998 a, 西太平洋 GPS 連続観測網データの解析について (その 1), *測地学会誌*, **44**, 1-19.
- 小竹美子・加藤照之・宮崎真一・仙石 新, 1998 b, GPS 観測に基づくフィリピン海プレートの相対運動と西南日本のテクトニクス, *地震 II*, **51**, 171-180.
- 小竹美子・加藤照之, 2001, GPS 観測に基づくフィリピン海プレート南東部のテクトニクスについて, 日本地震学会講演予稿集 2001 年度秋季大会, C01
- 小竹美子, 2000, GPS データ解析に基づく西太平洋のテクトニクスの研究, *地震研究所彙報*, **75**, 229-234.
- 小竹美子, 2002, 西太平洋 GPS 連続観測データの解析について, *地震研究所技術研究報告*, **8**, 27-28.
- Nocquet, J.-M., E. Calais, Z. Altamimi, P. Sillard, and C. Boucher, 2001, Intraplate deformation in western Europe deduced from an analysis of the International Terrestrial Reference Frame 1997 (ITRF97) velocity field, *J. Geophys. Res.*, **106**, 11239-11257.
- Rothacher, M., and L. Mervart (eds.), 1996, Documentation of the Bernese GPS Software Version 4.0, Astronomical Institute, University of Berne, Bern, Switzerland, 418pp.
- Sella, G.F., T.H. Dixon, and A. Mao, 2002, REVEL: a model for recent plate velocities from space geodesy, *J. Geophys. Res.*, **107**, 10.1029/2000JB000033.
- Wessel, P., and W.H.F. Smith, 1991, Free software helps map and display data, *EOS Trans. AGU*, **72**, 441, 445-446.

(Received March 31, 2003)
(Accepted June 3, 2003)

Preface to Special Issue on “Seismogenic Zone Drilling for Earthquake Generation Process”

Information on ambient conditions and in-situ physical/mechanical properties of active faults at depth provide us with answers to fundamental questions about the earthquake generation process. From this point of view, drilling to the seismogenic zone of a plate boundary, where great earthquakes have occurred frequently and damaged human society, is believed to be essential for understanding the earthquake generation process. However, drilling to the seismogenic zone had been impossible due to its depth. The Integrated Ocean Drilling Program (IODP) is scheduled to start in October 2003. Under the IODP, a new drilling vessel named “Chikyu” will be provided and we will be able to drill up to 6 km under the sea floor with state-of-the-art riser drilling technology. This means that sampling and monitoring by drilling into the seismogenic zone of an active plate boundary fault system will become possible. It will take long time and be costly to reach the seismogenic zone in a plate boundary, even if we use state-of-the-art drilling technology. Therefore, we must make the most of the opportunities of deep drilling to obtain important information for the earthquake generation process. The success of this type of scientific drilling project depends on active plans based both on scientific background/objectives, and technology developments.

To discuss the scientific objectives and the necessary technological developments for seismogenic zone drilling, we had a two-day meeting at the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo on June 12th and 13th, 2002, with approximately 90 scientists and engineers. The first object of the workshop was to review the current research on the Nankai seismogenic zone, which is thought to be one of the major targets of drilling under the IODP. The reviewed research consisted of microearthquake activity observed by ocean bottom seismometer array, asperity distribution estimated from great earthquakes, slip distribution from Tsunami, geodetic and earthquake inversion, thermal structure, and seismic structures. The second object was to discuss scientific objectives and targets of seismogenic zone drilling. Some of the targets are to understand the nature of asperity and to obtain critical parameters for earthquake generation. This special issue is based on the discussions during the workshop.

We believe this special issue will provide us with basic data and ideas on Nankai seismogenic zone drilling to better understand seismic and aseismic faulting processes and mechanism that controls the transition from aseismic to seismic fault slip.

Hisao Ito (Geological Survey of Japan, AIST),
Ryota Hino (Tohoku University),
Masanao Shinohara (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)
and
Aitaro Kato (IFREE, JAMSTEC & ERI, The University of Tokyo)

Invited editors of the special issue on
“Seismogenic Zone Drilling for Earthquake Generation Process”