HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	兵庫県南部地震(1995年1月17日)におけるGPS観測
Author(s)	加藤, 照之; Catane, John Patrick L.; 茶珎, 俊一 他
Citation	測地学会誌, 43(3), 181-207 https://doi.org/10.11366/sokuchi1954.43.181
Issue Date	1997-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/57968
Type	journal article
File Information	Sokuchi_43_181-.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

測地学会誌，第 43 巻，第 3 号
(1997)，181-207 頁

Journal of the Geodetic Society of Japan
Vol. 43, No. 3, (1997), pp. 181-207

兵庫県南部地震（1995 年 1 月17日）における GPS 観測

加藤照之[1]，John Patrick L. Catane[2]，茶珎俊一[3]，藤森邦夫[4]，
平原和朗[5]，平田安廣[1]，細　善信[6]，市川隆一[7]，井口博夫[8]，伊勢崎修弘[9]，
岩淵哲也[10]，笠原　稔[11]，木股文昭[12]，小竹美子[1]，久保篤規[13]，熊谷博之[12]，
松島　健[14]，三浦　哲[15]，中村佳重郎[6]，中野健秀[6]，中尾　茂[1]，奥田　隆[12]，
大塚成昭[16]，田部井隆雄[17]，田所敬一[6]，高橋浩晃[18]，寺島　敦[2]，
徳山　明[19]，山本剛靖[20]，山岡耕春[12]

1）東京大学地震研究所
2）神戸大学大学院理学研究科
3）DX アンテナ株式会社
4）京都大学大学院理学研究科
5）名古屋大学大学院理学研究科
6）京都大学防災研究所
7）通信総合研究所鹿島宇宙通信センター
8）神戸大学内海域機能教育研究センター
9）千葉大学理学部
10）国立天文台地球回転研究系
11）北海道大学理学部地震予知観測地域センター
12）名古屋大学理学部地震火山観測地域センター
13）国立極地研究所
14）九州大学理学部島原地震火山観測所
15）東北大学理学部地震予知・火山噴火予知観測センター
16）神戸学院大学人文学部
17）高知大学理学部
18）北海道大学大学院理学研究科
19）兵庫教育大学
20）気象研究所

（1997 年 5 月 1 日受付，1997 年 9 月 16 日改訂，1997 年 9 月 22 日受理）

Global Positioning System Observation before and after the Hyogo-ken Nanbu Earthquake of January 17, 1995, Japan

Teruyuki Kato [1], John Patrick L. Catane [2], Toshikazu Chachin [3], Kunio Fujimori [4], Kazuro Hirahara [5], Yasuhiro Hirata [1], Yoshinobu Hoso [6], Ryuichi Ichikawa [7], Hiroo Inokuchi [8], Nobuhiro Isezaki [9], Tetsuya Iwabuchi [10], Minoru Kasahara [11], Fumiaki Kimata [12], Yoshiko Kotake [1], Atsuki Kubo [13], Hiroyuki Kumagai [12], Takeshi Matsushima [14], Satoshi Miura [15], Kajuro Nakamura [6], Takehide Nakano [6], Shigeru Nakao [1], Takashi Okuda [12], Shigeaki Otsuka [16], Takao Tabei [17], Keiichi Tadokoro [6], Hiroaki Takahashi [18], Tsutomu Terashima [2], Akira Tokuyama [19], Takeyasu Yamamoto [20], and Koshun Yamaoka [12],

1) Earthquake Research Institute, University of Tokyo
2) Graduate School of Science, Kobe University
3) DX Antenna Co. Ltd
4) Graduate School of Science, Kyoto University
5) Graduate School of Science, Nagoya University
6) Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
7) Kashima Space Research Center, Communications Research Laboratory
8) Kobe University Research Center for Inland Seas
9) Faculty of Science, Chiba University
10) Division of Earth Rotation, National Astronomical Observatory
11) Regional Observation Center for Earthquake Prediction, Faculty of Science, Hokkaido University
12) Research Center for Seismology and Valcanology, Faculty of Science, Nagoya University
13) National Polar Research Institute
14) Shimabara Earthquake and Volcano Observatory, Faculty of Science, Kyushu University
15) Earthquake Prediction and Vocanic Eruption Observation Center, Faculty of Science, Tohoku University
16) Kobe Gakuin University
17) Faculty of Science, Kochi University.
18) Graduate School of Science, Hokkiado University
19) Hyogo Kyoiku University
20) Meteorological Research Institute

(Received May 1, 1997; Revised September 16, 1997; Accepted September 22, 1997)

Abstract

The Hyogo-ken Nanbu earthquake (M_{JMA}7.2), that took place on January 17th, 1995, in Kobe and Awaji area, caused tremendous disasters in the areas. After the earthquake, the Japanese University Consortium for GPS Research (JUNCO) deployed more than 30 GPS receivers around the hypocentral area to find co-seismic and to monitor post-seismic crustal deformations related to the earthquake. Data have been archived first by on-site recordings and later by tele-communcations at the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univeristy.

Temporary dense array terminated by the end of March, 1995. Further temporary occupations were conducted in May, 1995, in November, 1995, and in March, 1996, as well as long term continuous monitorings at selected several sites. The monitorings ended in August, 1996.

Co-seismic offsets were observed at several sites around the source area. The largest offsets amounted to 45cm at Iwaya site which is about 4 km east of the Nojima fault. These data were used for simultaneous inversion together with strong motion data to clarify slip distribution on the buried rectangular faults.

Post-seismic deformations were also found at all of sites. They mostly showed temporal decay and amounted to 2 to 3 cm. The largest one was observed at Iwaya site. The areal distribution of post-seismic displacement vectors seems to indicate afterslip on the fault planes, but not the areal visco-elastic readjustments. Relaxation processes at Iwaya and Kawaragi sites were fitted by a logarithmic curve. Application of a theory on the mechanics of afterslip based on the constitutive relationship of a fault surface indicated that the fitting give reasonable estimate on the frictional rate parameter or the thickness of velocity-strengthning layer of the earth's surface. Assuming that the constitutive parameter is ranging from 0.001 to 0.005 based on the results of rock experiments, thicknesses of velocity-strengthning layer at Iwaya and Kawaragi were estimated to be ranging between 500m and 2 km, which is consistent with other seismological data.

Monitoring of fault offsets using real-time kinematic GPS (RTK-GPS) were also conducted at two baselines crossing the Nojima fault and the Arima-Takatsuki tectonic line, respectively. Though significant deformation was not observed, it showed a potential capability of real time monitorings of ground deformations in a few centimeter accuracy.

1. はじめに

1995年1月17日午前5時46分（日本時間），兵庫県南部の明石海峡に発生した地震は神戸市と淡路島を中心とした地域を襲い，6427名の死者・行方不明者（1996年12月26日現在；消防庁調べ）をはじめとする甚大な被害を兵庫県南部地域にもたらした．この地震は気象庁により「1995年兵庫県南部地震」と命名された．気象庁によれば，マグニチュードは7.2，本震の震源は明石海峡の淡路島付近（北緯34°36'；東経135°02'）で深さは16 kmであった．また，本震のメカニズムは東西圧縮の右横ずれ断層である（大阪管区気象台・気象庁地震予知情報課，1995）．Figure 1に本震の位置と以下に述べるGPS観測を実施した地域を示す．大学の合同余震観測班は地震直後から震源近傍での稠密アレイ観測によって余震を高精度に決定した（Hirata *et al.*, 1996）．Figure 2はこのグループによって決められた余震の分布図である．同図には本震のメカニズムも示す．図から，余震が北東から南西に延びる六甲～淡路断層系に沿って分布しており，本震が東西圧縮の応力下で起こった右横ずれ断層であったことがわかる．この地震に際して淡路島の野島断層に最大約2 mに達する地震断層が現われた（例えば中田他，1995）．一方，神戸側では地表には断層は現われなかった．

地震発生以前には断層近傍の地域においては，神戸大学が数点の観測点においてGPS観測を定期的に実施していたが，地震後の地殻変動を詳細に調査するためには不充分であると考えられた．そこで，この地震の発生直後から全国の大学のGPS研究者で組織する「GPS大学連合」は，主としてこ

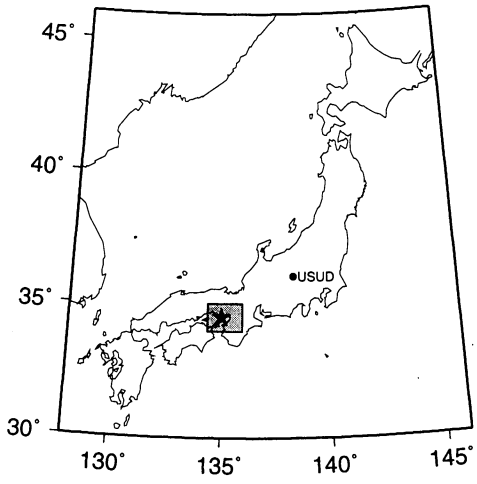


Fig. 1. Epicenter of the Hyogo-ken Nanbu earthquake shown by an asterisk and the studied area shown by shadow. Usuda (USUD) IGS site is used as reference site for a part of data analyses.

の地震による余効変動調査のために大規模なGPS臨時観測を行った．1996年8月にこのプロジェクトは終結したので，これまでの成果を概観しつつ，経過を振り返ってみたい．

地震後約1年半にわたる観測において我々が目的としたのは，主として地震後の余効変動の詳細な時空間変化を明らかにして，そのメカニズム解明のための基礎資料を得ることであるが，そのほかにも下記のような目標を設定した；

1) 地震発生時の地殻変動を明らかにし，地震の発生機構を明らかにすること，
2) きたるべき最大余震に着目してその前兆的変動を捕らえること，
3) この地震を契機として地殻活動が他の近接する地域にどのように伝播していくかを監視すること，
4) リアルタイムキネマティックGPSの試験的観測を実施し，高い時間分解能で地殻変動をリアルタイムに監視することの可能性を探ること，

等である．

本報告では，観測体制と観測経過及びこの観測から得られた資料の解析結果について述べる．これらの大部分は既に他に報告されたものであるが（例えば，寺島，1995a, 1995b；GPS大学連合，1995a, 1995b；GPS大学連合［平原和朗］，1995; Tabei *et al*, 1996; Hirahara *et al*., 1996; Kato *et al*., 1996; Nakano and Hirahara, 1997），ここではこれらのうちの重要な部分について整理し，まだ正式に報告されていない一部の資料をあわせて紹介すると共に，新たに余効変動の発生機構について考察を加える．

2. 観測の体制と経過

地震発生の約1日後から数日間かけて第一陣による観測が開始された．当初は現地での小型計算機（PC）収録による観測が主体であり，主として断層近傍での余効変動観測に力が注がれた．最初は神戸側が兵庫教育大学（観測点コード：1184），口吉川（1183），淡河（1182），六甲牧場（1181），神戸大学（KOBE）及びその補点（1180），宝塚（TKRZ），夙川（SHKG），瓦木（KWRG），須磨

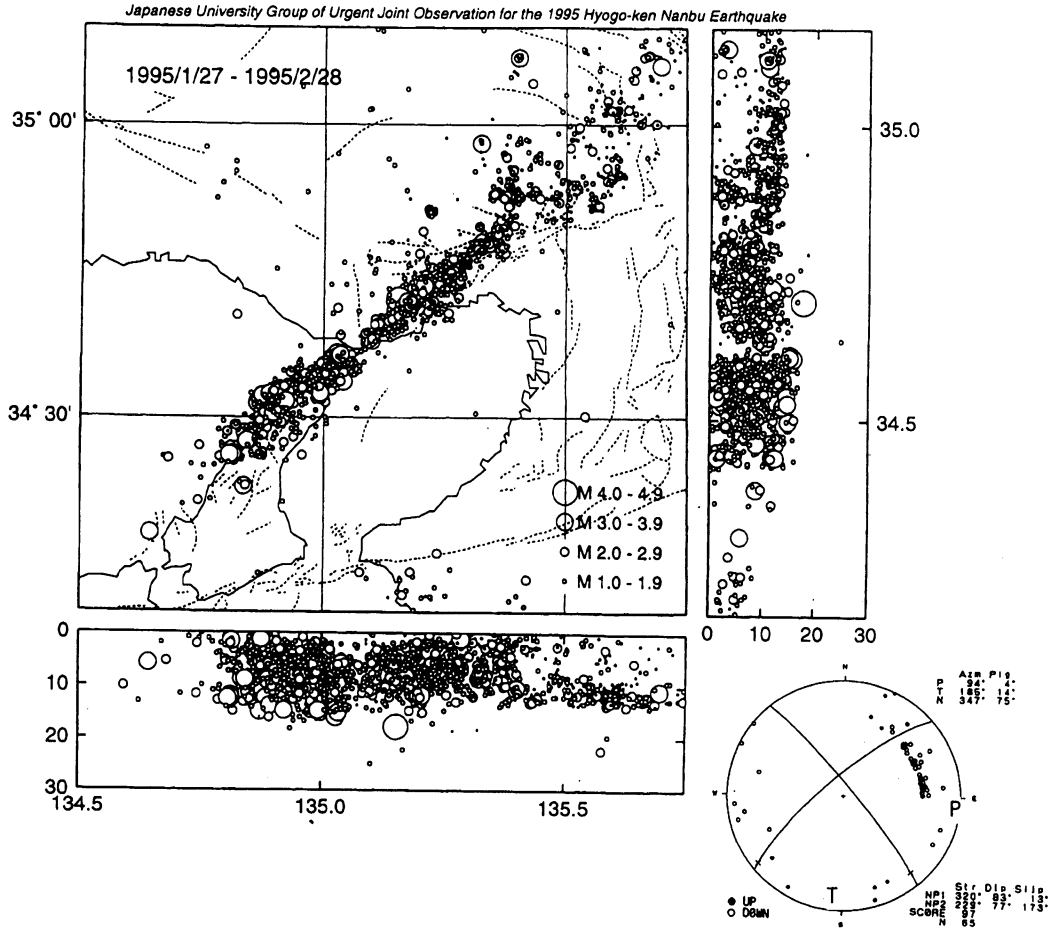


Fig. 2. Aftershock distribution of the Hyogo-ken Nanbu earthquake (from January 20, 1995 to February 28, 1995) (Hirata *et al.*, 1996) and the focal mechanism solution of the main shock projected to lower hemisphere (after Osaka District Meteorological Observatory, JMA, and Earthquake Prediction Information division, JMA, 1995)

(SUMA)，淡路島側は岩屋（IWAY)，津名（SANO)，一宮（ICHI)，富島（TOSI)，北淡町役場（TOS2)，県民サンビーチ（TOS3)，緑（MIDO)，大麻（NRT0）などの観測点が立ち上がった．その後，有馬－高槻構造線やその北方への地震活動の拡大の懸念から，主として断層の北東方向への延長部を中心として観測点を拡充した．豊中（KMDR)，川西（MEIH)，玉瀬（TAMS)，園和北（SNWK）などがこのような点である．その後観測点を増強するため西加舎公民館（HONM)，東ときわ台小（TOKI)，神戸商船大（KOBS）及びその補点（KOB2）を設置した．また，地震前より定期的な観測を実施していた阿武山（ABYM)，京都（KYT_)，神戸学院大（AKS0）もこの観測網の中に取り入れられた．

観測当初の臨時観測ではPCへの収録がうまく行かなかったところもあり，とりこぼしのあった観測点もある．また，メモリーの制限やデータ取得から解析までの遅延など臨時の観測体制では様々な制約があった．そこで，主要な観測点についてはより安定しかつ即時のデータ取得・解析を確保する

Table 1. List of GPS temporary observation sites after the Hyogo-ken Nanbu earthquake

	観測点名	コード	所在地	緯度	経度	受信機	Telemetry	備考
1	豊中	KMDR	大阪府豊中市北緑が丘2-4-1	34 48 48	135 29 28	Ashtech Z-12	YES	Kinematic 専用線
2	川西	MEIH	兵庫県川西市萩原台西3-242	34 50 51	135 24 34	Ashtech Z-12	YES	Kinematic 専用線
3	阿武山	ABYM	大阪府高槻市名佐原944	34 51 36	135 34 25	Ashtech Z-12	YES	公衆網
4	園和北	SNWK	大阪府尼崎市田能1-7-1	34 45 45	135 26 34	Ashtech Z-12	NO	PC
5	玉瀬	TAMS	兵庫県宝塚市玉瀬	34 53 06	135 18 37	Ashtech Z-12	YES	公衆網
6	岩屋	IWAY	兵庫県津名郡淡路町岩屋	34 34 42	135 01 30	Ashtech Z-12	YES	公衆網
7	富島	TOS1	兵庫県津名郡富島字小倉山824	34 3242	134 55 54	Ashtech Z-12	YES	Kinematic 専用線
8	北淡町役場	TOS2	兵庫県津名郡北淡町富島401	34 32 48	134 55 48	Ashtech Z-12	YES	公衆網
9	県民サンビーチ	TOS3	兵庫県津名郡北淡町	34 33 00	134 56 30	Ashtech Z-12	YES	Kinematic 専用線
10	緑	MIDO	兵庫県三原郡緑町広田中筋121	34 19 12	134 50 18	Ashtech Z-12	YES	公衆網
11	大麻	NRT0	徳島県鳴門市大麻町大谷字中筋41	34 09 00	134 31 48	Ashtech Z-12	NO	PC
12	神戸大学補	1180	兵庫県神戸市灘区	34 43 22	135 14 20	Trimble 4000SSE	YES	公衆網
13	神戸大学	KOBE	兵庫県神戸市灘区	34 43 22	135 14 20	Ashtech P-12	NO	PC
14	六甲山牧場	1181	兵庫県神戸市灘区六甲	34 44 47	135 12 14	Trimble 4000SSE	YES	公衆網
15	兵庫教育大	1184	兵庫県加東郡社町下久米942-1	34 54 31	135 01 01	Trimble 4000SSE	YES	公衆網
16	宝塚小	TKRZ	兵庫県宝塚市川面1-7-34	34 48 40	135 20 58	Trimble 4000SSE	YES	公衆網
17	夙川学院	SHKG	兵庫県西宮市神園町2-20	34 45 23	135 19 53	Trimble 4000SSE	YES	公衆網
18	瓦木小	KWRG	兵庫県西宮市大屋町10-20	34 44 38	135 21 58	Trimble 4000SSE	YES	公衆網
19	須磨友が丘高	SUMA	兵庫県神戸市須磨区友が丘1-1-5	34 40 04	135 06 05	Trimble 4000SSE	YES	公衆網
20	神戸学院大	AKS0	兵庫県神戸市西区	34 39 30	135 02 00	Ashtech Z-12	NO	PC
21	京都	KYT_	京都府京都市左京区北白川追分町	35 01 39	135 47 11	Ashtech Z-12	NO	PC
22	津名	SANO	兵庫県津名郡津名町佐野894	34 27 42	134 56 36	Trimble 4000SSE	YES	公衆網
23	一宮	ICHI	兵庫県津名郡一宮多賀600	34 27 24	134 50 53	Trimble 4000SSE	YES	公衆網
24	西加舎公民館	HONM	京都府亀岡市本梅町	35 00 22	135 29 03	Ashtech Z-12	NO	PC
25	東ときわ台小	TOKI	大阪府豊能郡豊能町東ときわ台	34 53 44	135 27 16	Ashtech Z-12	NO	PC
26	神戸商船大	KOBS	兵庫県神戸市東灘区青木（おおぎ）	34 43 11	135 17 27	Trimble 4000SSE	NO	PC
27	神戸大学補2	KOB2	兵庫県神戸市灘区六甲台町	34 43 33	135 14 06	Trimble 4000SSE	NO	PC
28	淡河（おうご）	1182	兵庫県神戸市北区淡河	34 47 49	135 07 45	Trimble 4000SSE	NO	
29	口吉川（くちよかわ）	1183	兵庫県三木市口吉川	34 51 32	135 03 46	Trimble 4000SSE	NO	
30	宝塚FL	TKKB	兵庫県宝塚市武庫川町6-28	34 48 24	135 21 10	Trimble 4000SSE	NO	無線送信(kinematic base)
31	宝塚小K	TKKR	兵庫県宝塚市川面1-7-34	34 48 40	135 20 58	Trimble 4000SSE	NO	無線受信(Kinematic remote) PC
32	摩耶	MAYA	兵庫県神戸市灘区	34 43 40	135 12 30	Ashtech P-12	NO	
33	松蔭	SOIN	兵庫県神戸市灘区	34 43 30	135 13 45	Ashtech P-12	NO	
34	沼島	NUSH	兵庫県三原郡南淡町沼島	34 10 00	134 49 30	Ashtech P-12	NO	

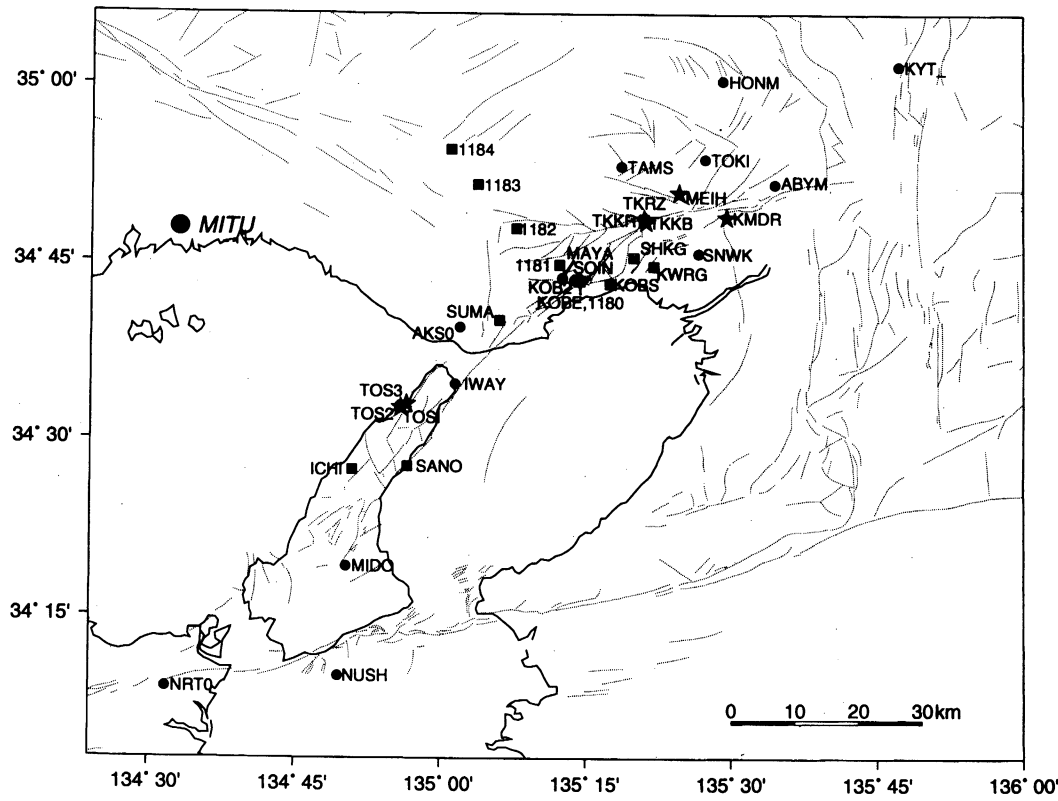


Fig. 3. Site distribution of GPS observation by the Japanese University Consortium for GPS Research (JUNCO).

ため2月に入って逐次公衆網電話回線を用いたテレメータ観測に移行した．観測点は短期の観測も含め総計34カ所，うちテレメータを実施したのは専用線を含め18カ所にのぼる．Table 1に各観測点の概要を，またFigure 3に展開した観測点の分布を示す．Figure 2と比較して分かるように，GPS観測網はこの震源断層に近接するように密に配置されている．

観測には主としてTrimble社製4000 SSE型（以後Trimbleと呼ぶ）及びTOPCON社製GP-R1DY型（Ashtech社製Z-12型同型品；以後Ashtechと呼ぶ）を用いた．テレメータはGPS受信機の型によって方式が異なるため，Ashtechは京大防災研に，Trimbleは東大地震研に，それぞれ1日1回伝送を行った．東大に集められたデータはさらにINTERNETを通じて京大防災研へ集められ，すべてのデータが京大防災研に集約されることとなった．現地収録の際は観測時間やサンプリングは必ずしも統一されてはいなかったが，おおむね30秒サンプリング，10時間以上の観測時間が確保された．特にテレメータが実施された観測点では24時間観測が実施されている．Figure 4に観測体制とデータの流れを示す．

余震活動が順調に減衰したこともあって，3月末には多数の観測点での連続観測を中止した．このあとは野島断層を継続監視するために淡路島側の北淡町役場と岩屋を，また，地震活動の北方への拡大を懸念して神戸側の玉瀬と豊中でテレメータ観測を継続したほか，同年5月29日～6月3日，11月17日～22日，翌1996年2月26日～3月1日に臨時の集中観測を実施した．連続観測はその後も

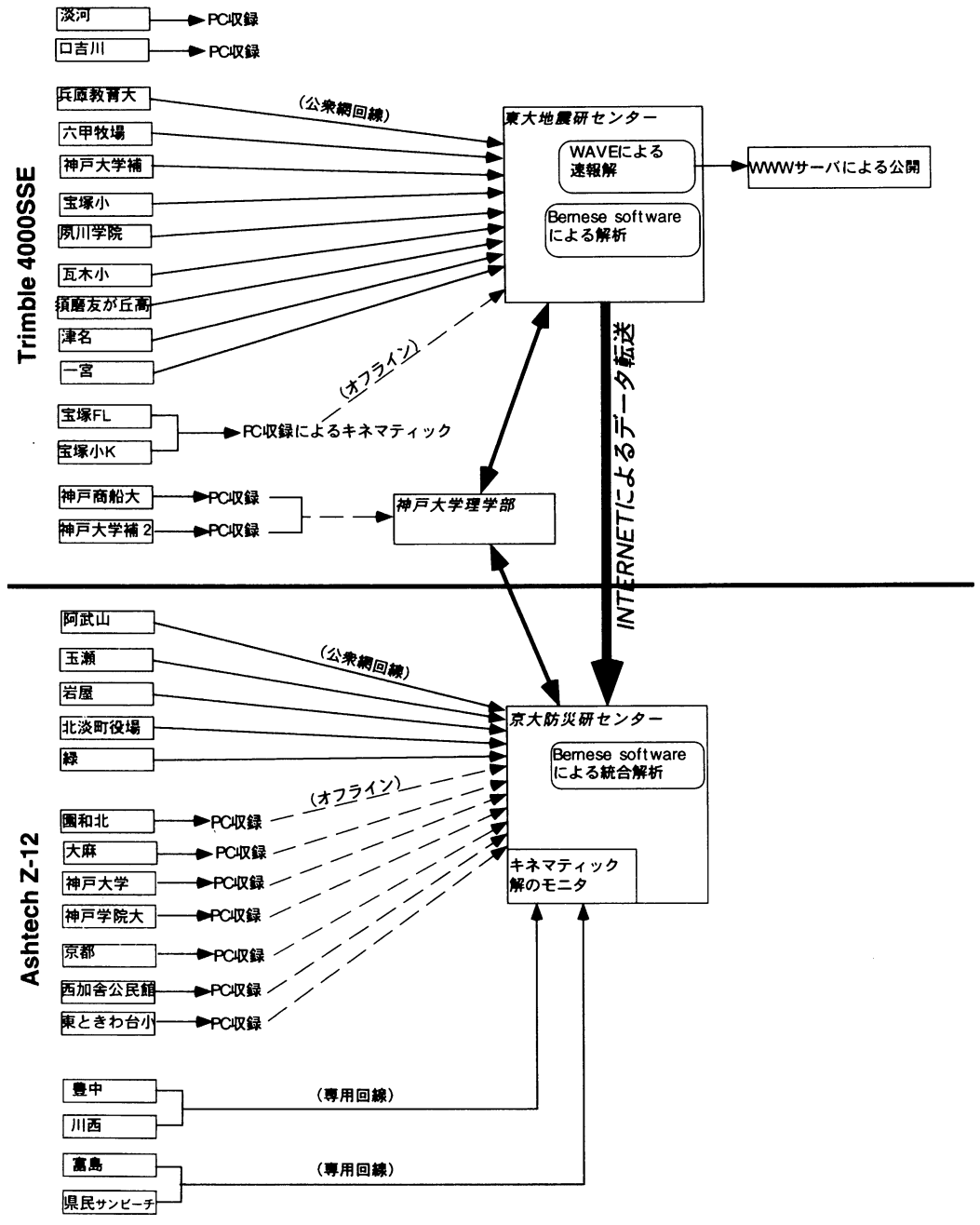


Fig. 4. Data flow of the GPS observation for the temporary dense array after the Hyogo-ken Nanbu earthquake.

継続されたが1996年8月21日までにはテレメータ点も撤収し，この地震に関連したGPS観測は終了した．

なお，1995年5月には猪名川町付近の群発地震活動を調査するために京大防災研が同市に臨時のGPS観測点を設置したが，本報告には含めないでおく．

3. データの解析結果と議論

データの解析はそれぞれの目的に応じて分担して実施された．解析には主としてBerneseソフトウェア（e.g. Rothacher *et al.*, 1993）を使用した．Catane (1995), 寺島（1995a, 1995b）及びTabei *et al.*（1996）は地震の前後に同じ観測点で観測されたデータを用い，地震時の地殻変動を調査した．Yoshida *et al.*（1996）は大学による結果の他，地理院によるGPS・測地測量データ及び強震動データを含めた同時インバージョンを実施し，震源断層面上の変位ベクトルの分布を推定した．また，Kato *et al.*（1996）は地震研究所に集められたTrimbleデータについて速報的に解析を実施し，地震直後の余効変動を調査した．さらに，京都大学防災研究所のグループは全観測データを用いて詳細な基線解析を行い，震源域周辺の余効変動分布を明らかにし，そのメカニズムを考察した（Hirahara *et al.*, 1996; Nakano, 1996; Nakano and Hirahara, 1997）．Hirahara *et al.*（1996）は野島断層を横断する短距離基線ではじめてリアルタイムキネマティック（RTK）方式による地殻変動の微細な推移を観察した．以下の節で，地震時の地殻変動と余効変動について解析結果を示すと共に，そこから推定される震源・余効変動過程について議論する．また，リアルタイムキネマティックGPS（RTK-GPS）についても解析結果を示し，その意義について述べる．

3.1 地震時の地殻変動と震源過程

地震発生以前より神戸大学と京都大学・神戸学院大学によって近畿地方から中国地方において定期的な観測が実施されていた．震源域近傍では，神戸側は神戸大学（KOBE），摩耶（MAYA），松蔭（SOIN），神戸学院大（AKS0），淡路島側は岩屋（IWAY），津名（SANO），緑（MIDO），沼島（NUSH），などがこのような観測点である．そこで，地震前に実施された観測点において地震後再度観測を実施し，前後を比較することによって地震時の地殻変動を明らかにすることを試みた．神戸大学が地震前より観測を実施していた観測点と地震後に得られたデータと比較して得た地震時の水平変位量をFigure 5 (a)に示す（寺島，1995a）．ここでは神戸大学（KOBE）を不動として変位を示してある．神戸大学の観測点である摩耶（MAYA）観測点は北へ約9 cm，岩屋（IWAY）は西へ約43cm，沼島（NUSH）は南へ約8 cm移動しているのがわかる．また，松蔭（SOIN）は地震前後で神戸大学に対して北へ1 cm移動したことが報告されている（寺島，1995b ; Figure 5 (b)）．

一方，これとは独立にTabei *et al.*（1996）はFigure 6に示すような地震時の変位ベクトルを得た．Table 2に変位の各成分を示す．この解析では，AKS0，SANO，MIDOについては京都（KYT_）を基準点とし，ここを不動としたが，IWAYはIGS（国際GPSサービス機構）観測点の臼田（USUD）を基準とした（Figure 1）．図から明らかなように野島断層から約4 km程東にある岩屋（IWAY）の観測点では地震前後で約45 cmにのぼるほぼ西方向の変位が見られ，寺島（1995a, 1995b）の結果と調和的である．このことは逆に神戸（KOBE）に大きな変位がなかったことを示唆している．後のインバージョンの結果が示すように神戸大学は断層のほとんど真上にあっていわゆる節面上に位置していたためと，神戸側では断層が地表に露出していなかったことが原因であろう．神

Table 2. Co-seismic horizontal displacements due to the Hyogo-ken Nanbu earthquake. unit : m (after Tabei *et al.*, 1996)

Sites	North	East	Vertical	Amp.	Azimuth
Akashi	.360±.002	.171±.007	.144±.007	.399	N 25.4 E
Tsuna	-.352±.029	-.018±.041	.218±.049	.352	N 182.9 E
Midori	-.081±.022	-.015±.032	.130±.040	.082	N 190.5 E
Kobe	.019±.004	-.014±.012	.133±.023	.024	N 323.6 E
Iwaya	-.059±.004	-.449±.013	-.025±.024	.453	N 262.5 E

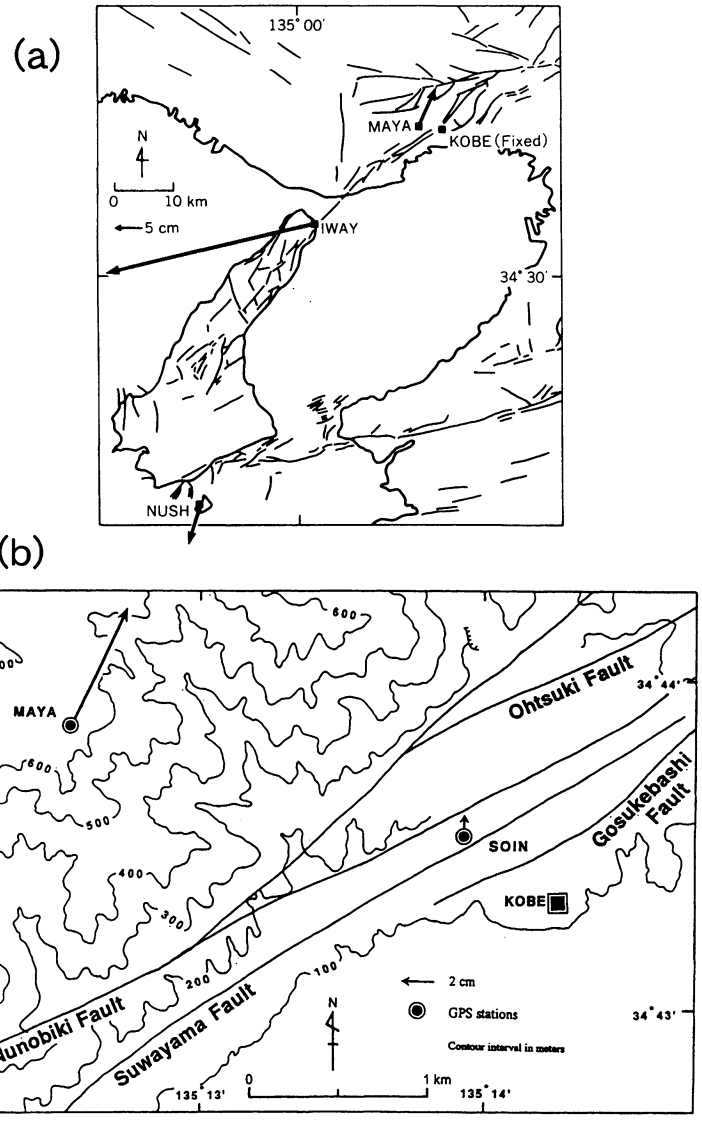


Fig. 5. Co-seismic horizontal displacement vectors of the Hyogo-ken Nanbu earthquake. (a) Maya (MAYA), Iwaya (IWAY) and Nushima (NUSH) Relative to Kobe University (Terashima, 1995a). (b) Maya (MAYA) and Soin (SOIN) relative to Kobe University (Terashima, 1995b).

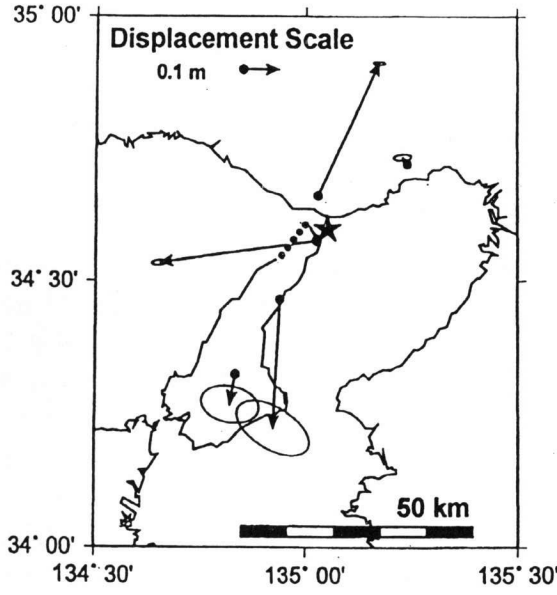


Fig. 6. Co-seismic horizontal displacement vectors with 95% confidence ellipses of the Hyogo-ken Nanbu earthquake (Tabei *et al.*, 1996).

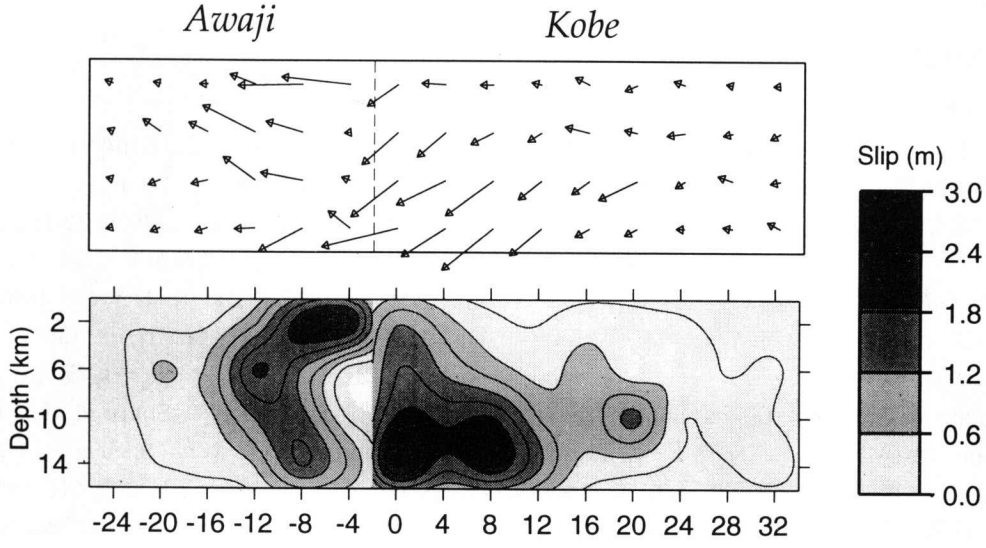


Fig. 7. Slip and its direction distribution estimates by the simultaneous inversion using geodetic and strong motion data due to the Hyogo-ken Nanbu earthquake (Yoshida *et al.*, 1996)

戸学院大，津名の観測点でもそれぞれ約40 cm，35 cmの大きな変位が見られる．なお，名古屋大学他（1995）は，神戸大学の変位を約6 cmの北東への変位と推定している．また，断層南側の緑（MIDO）および中央構造線をはさんだ南側の沼島（NUSH）では約8 cmの南方への変位が観測され

ている．

当時．地理院の全国GPS連続観測システム（GRAPES）がすでに稼働しており（例えば鎌田，1995）．明瞭な地震時の変動が震源をとりまくいくつかの観測点で見られるが，近接観測点がなかったこともあり．その最大変位は高々約4 cmであった（Hashimoto *et al.*, 1996）．我々の観測データ，地理院のGRAPESによる資料とその後実施した三角点におけるGPS観測による資料，及び強震データも併せた同時インバージョンがYoshida *et al.*（1996）によって行われ，断層面上でのスリップ分布が明らかにされた．Figure 7にその結果を示す．図は断層を大阪湾側から見た図であり，大阪湾側の断層面上のスリップ量と変位ベクトルを示す．断層面は淡路島付近を境に南北に2面あり，南側は淡路島の野島断層を中心とする断層面であり，若干南東側にディップするほぼ垂直の断層面（走向N43°E，傾きSE75°，長さ24 km，幅16 km），北側は神戸市内を突き抜ける若干北西にディップするほぼ垂直の断層面（走向N52°E，傾きNW85°，長さ36 km，幅16 km）を与えている．図から分かるように震源付近と野島断層付近直下に断層変位が2 mを越すような大きな箇所が見て取れる．一方，余震分布から予想されるほどには神戸側断層面では変位が大きくなく，北方宝塚市付近の浅いところでは変位がほとんどゼロに近いことがわかる．被害分布からは断層の北方端の有馬－高槻構造線付近でも震度7を記録し，大きな被害のあったことが報告されており（例えば大阪管区気象台・気象庁地震予知情報課，1995），興味深い．また，ここで仮定した断層面はいわゆる“震災の帯”（例えば嶋本，1995）よりは北側を通り，六甲活断層系に沿っていると考えている．断層がどこを通るかという議論もYoshida *et al.*（1996）によってなされている．測地データだけでは必ずしもどこを通るかは一意的にきまらないと思われるが，余震分布などから見ても断層は既存の活断層直下にあると考えるのが妥当と思われる．

3.2 余効変動観測とそのメカニズム

（a）GPSによる観測

これまで多くの地震で，本震発生後長い期間にわたって余効変動が観測されている事例は数多い．1923年関東地震（M 7.9; Scholz and Kato, 1978）や1946年南海地震（M 8.1; Fitch and Scholz, 1971）などの海溝沿いにおこる地震では数十年に及ぶ余効変動が知られている．1994年12月28日に発生した「三陸はるか沖地震」（M 7.5）ではGRAPESによって明瞭な余効変動が捉えられている（Heki *et al.*, 1997）．一方，内陸直下型地震による余効変動も数多く知られており，日本では1896年陸羽地震（M 7.5; Thacher *et al.*, 1980），1974年伊豆半島沖地震（M 6.9）（地質調査所，1980），外国では1966年パークフィールド地震（Smith and Wyss, 1968），1976年グアテマラ地震（M 7.5; Bucknam *et al.*, 1978），1987年Superstition Hills地震（M 7.1; Bilham, 1989, Sharp *et al.*, 1989, Williams and Magistrale, 1989）などがある．また，1992年Landers地震（M 7.5; Shen *et al.*, 1994）でははじめて断層周辺でのGPS観測により余効変動が捉えられている．内陸直下型地震に伴う余効変動は海溝型地震に比べ時定数が短くまた変位量も小さいことが多い．従って，兵庫県南部地震の余効変動を捉えるには極力早い観測の立ち上がりが必要であった．また，GPSの高精度を持ってすれば，このような小さな変動を精密に計測することが可能であると考えられた．このように，兵庫県南部地震はGPSが登場して以来我々が経験するはじめての内陸直下型の大きな地震であり，余効変動について多くのことを明らかにするよい機会であったともいえよう．

余効変動の詳細を明らかにするには長い期間にわたる調査が必要である．ここでは地震後1年半の間に得られた資料に基づく余効変動について記しておく．前節にも記したように．地震後のすべての

データは京大防災研に送付され．ここで資料の解析が行われた．ここでは主としてNakano（1996）による解析成果にもとづいて記しておく．

Figure 8（a）～（o）に結果の一部を示す．解析した期間は地震直後から同年11月までである．また，基準としては国土地理院GRAPESの御津（MITU）観測点をとり，ここを不動とした（Figure 3）．Figure 8全般からわかるように余効変動はほとんどの観測点で検出されている．しかしながら，その形態は系統的ではなく，時間と共に減衰するような変位を示す点や直線的に変位していく点，あるいは時間と共に変位の方向が逆転する観測点もある．

Figure 8（a）の岩屋（IWAY）は地震時の変位でも最大の変位を示した地点であり，一番明瞭な遷移的変位を示している．1995年4月以降も連続観測が実施された地点であり，その時間経過がよくわかる．図中1995年半ばころに基線の推定に大きなばらつきが見られるがこれは季節的な影響によるものと考えられる．Figure 8（b）は野島断層南端に近い一宮（ICHI）の例である．やはり夏場（5～6月）の結果が大きくばらついているが，大きな余効変動はないようである．Figure 8（c）はやはり断層の南側の緑（MIDO）である．観測の初期の頃に若干のトビが見られるが，原因は不明である．Figure 8（d）は神戸学院大（AKS0）の解析結果であり，若干北向きのドリフト的変位が見て取れよう．Figure 8（e）は宝塚（TKRZ）の解析結果であり，若干北西へのドリフトが見られる．Figure 8（f）は宝塚から数km北側の玉瀬（TAMS）観測点である．夏場の大きなばらつきに目をつぶれば宝塚とは同じような変位の傾向にある．このような北ないし北西方向への変位は断層の北～北東延長の観測点の阿武山（ABYM; Figure 8（l））, 京都（KYT_; Figure 8（m））などでも見られる．これとは反対にFigure 8（g）の夙川（SHKG）は南西方向，すなわち地震時変位と同じ方向に変位している．このすぐ南側の瓦木（KWRG）（Figure 8（h））は再び北西方向に変位しており，解釈がむつかしい．この瓦木はいわゆる“震災の帯”の東の端付近の観測点である．Figure 8（i）は神戸大学補点（1180）の変位で夙川と同じ南西への変位を示す．Figure 8（j）は神戸の北側にそびえる六甲山の頂上付近にある六甲牧場の敷地内におかれた観測点（1181）であるが，ここでは地震直後から2月の終わり頃にかけて大きな南東への変位が観測された．この変位は3月に一旦停止したように見えるが，その後南北成分は変位方向が逆転しているようにも見える．地震直後の大きな余効変動の原因はいまだに不明であるが，たびたび現地を調査した結果では例えば三脚の移動などはないと思われるので，より広域的な，例えば六甲山体の南東方向への移動と考えて良いものと思われる．近くに大きな崖崩れなどがないところを見ると，今の処どこに原因を求めて良いかよくわからない．Figure 8（k）は断層から北西方向に約32 km離れた兵庫教育大学におかれた観測点（1184）であり，玉瀬と同じような北西方向への変位が顕著である．Figure 8（n）は淡路島側の北淡町役場（TOS 2）の解析結果である．地震直後は南東すなわち断層に直交する方向に大きな変位を示していて興味深い．その後この変位は停止ないし逆転している．最後に，TOS 2とは断層を隔てて反対側で岩屋（IWAY）の南側に位置する津名（SANO）ではTOS 2とちょうど反対の変位が見られる（Figure 8（o））．

Nakano（1996）はこうして得られたデータに対し，この地域の永年変化分を広域の解析結果から推定して補正した量として各観測点の余効変動の変位速度を算出し直した．これによって得られる各観測点の変位速度ベクトルをFigure 9に示す．図から明らかなように，断層近傍の観測点では地震時の右横ずれと同位相の変位を示す点が多いことがわかるが，中には北淡町役場（TOS 2）のように断層走向に直交するような変位を示す点もある．また，有馬－高槻構造線以北の観測点では北から北西方向の変位が卓越しており，地震時変位の延長とは考えにくいような変位分布を示す．この領域では構造線南側とは異なるブロックの運動があると考えた方がよいかもしれない．

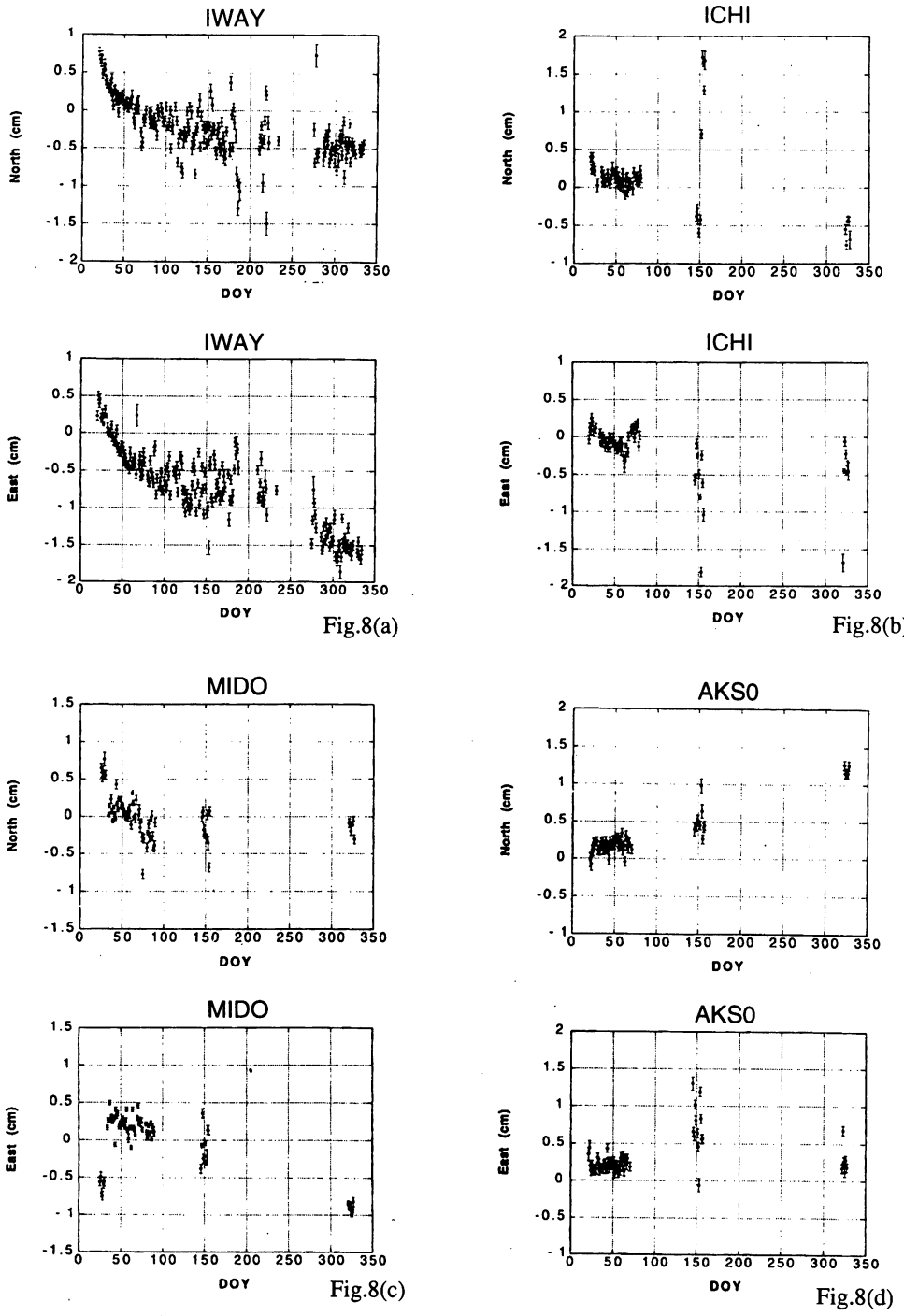


Fig. 8. Temporal changes of horizontal coordinates at GPS observation sites; (a) Iwaya (IWAY), (b) Sano (ICHI), (c) Midori (MIDO) and (d) Kobe Gakuin University (AKS0). Horizontal axis is the Julian date since the first date of 1995 (after Nakano, 1996).

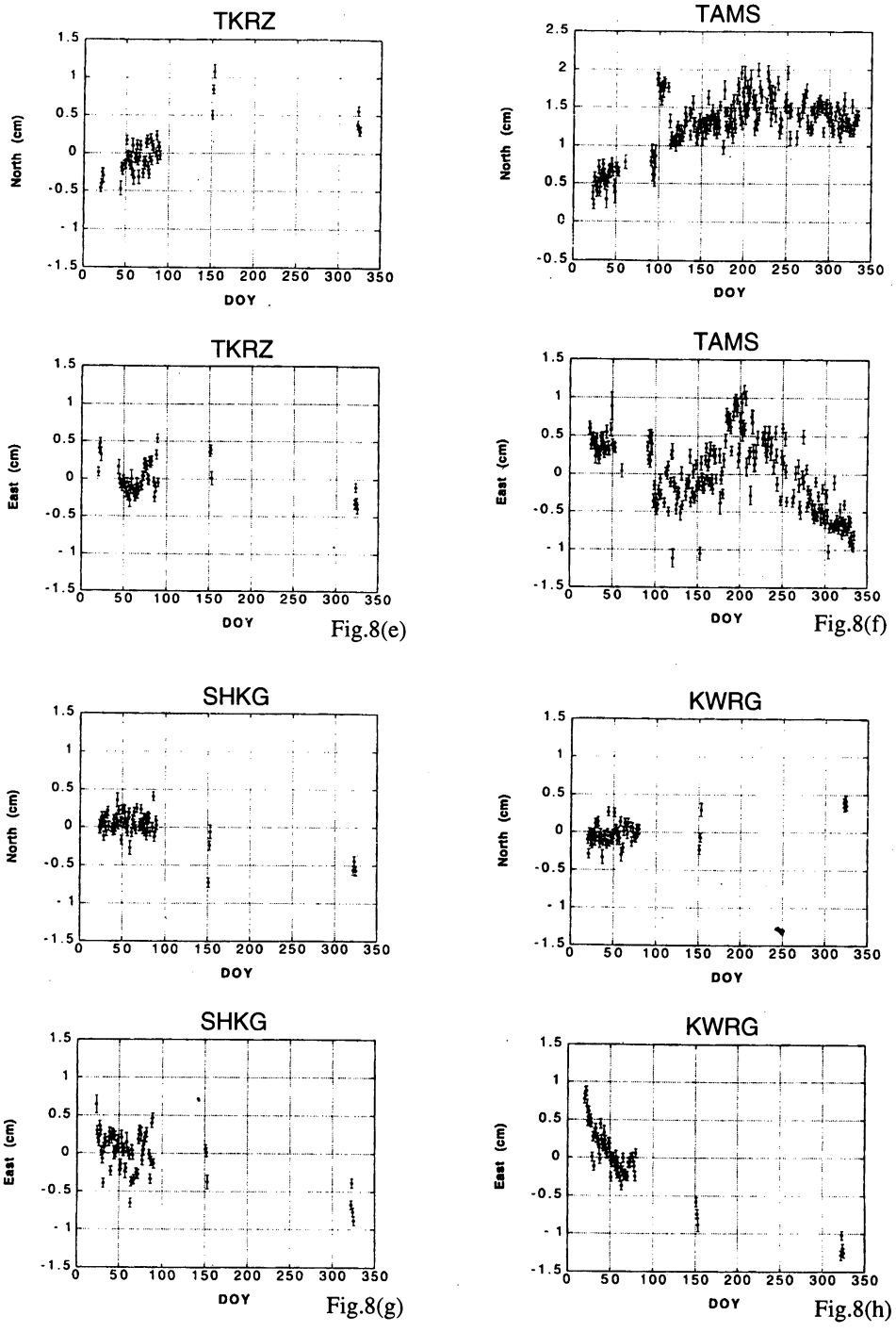


Fig.8(e) Fig.8(f) Fig.8(g) Fig.8(h)

Fig. 8. Temporal changes of horizontal coordinates at GPS observation sites; (e) Takarazuka (TKRZ), (f) Tamase (TAMS), (g) Shukugawa (SHKG), and (h) Kawaragi (KWRG). Horizontal axis is the Julian date since the first date of 1995 (after Nakano, 1996).

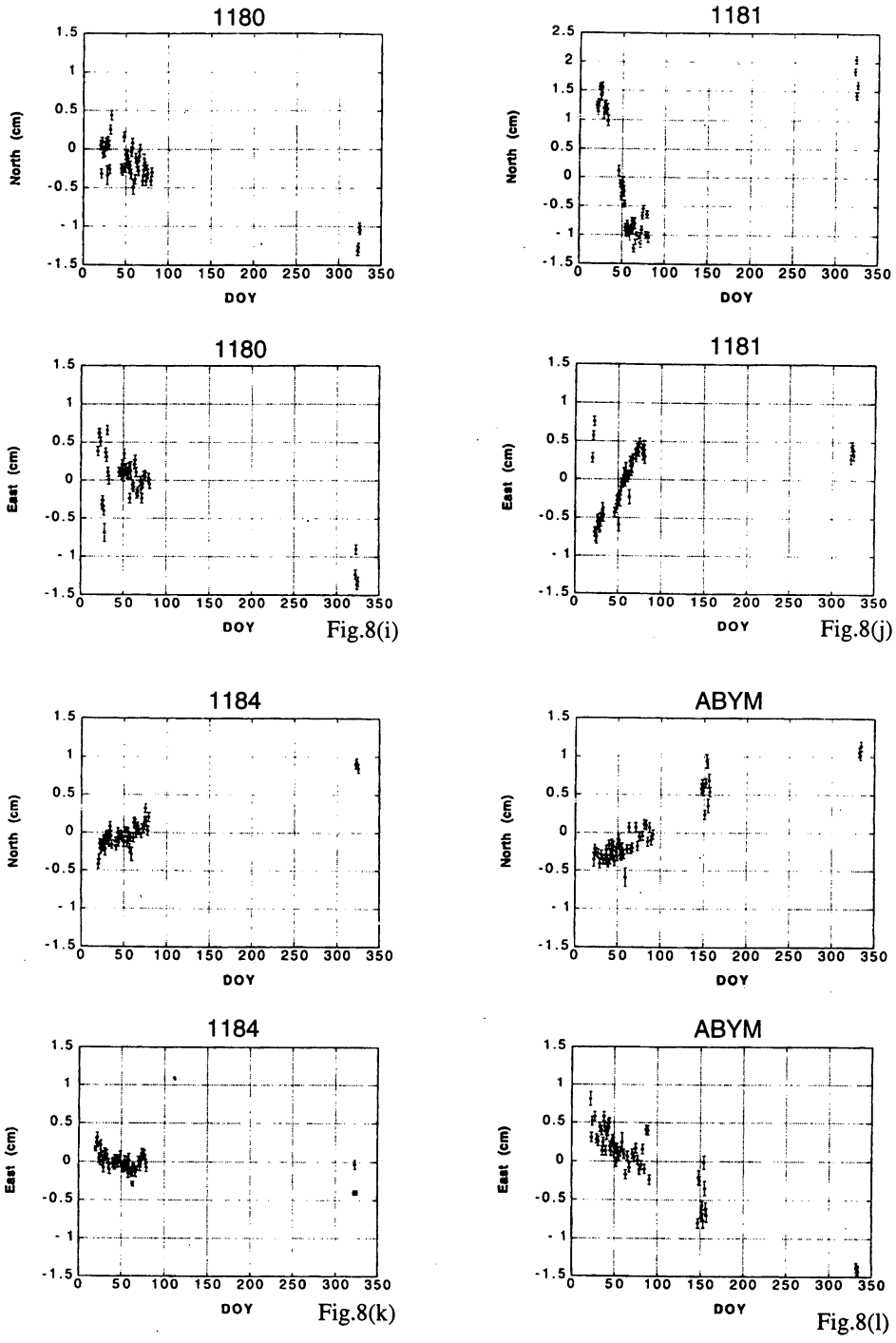
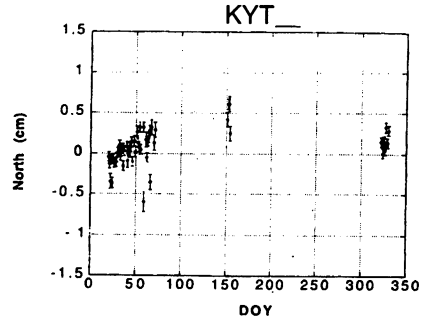


Fig. 8. Temporal changes of horizontal coordinates at GPS observation sites; (i) Kobe University Supplimental (1180), (j) Rokko Farm (1181), (k) Hyogo Kyoiku University (1184) and (l) Abuyama (ABYM). Horizontal axis is the Julian date since the first date of 1995 (after Nakano, 1996).



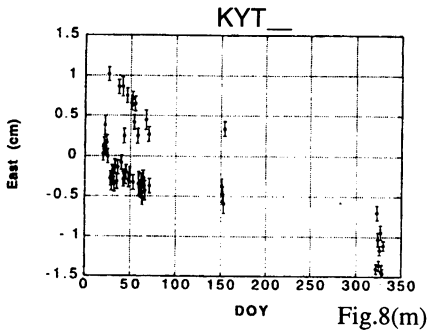
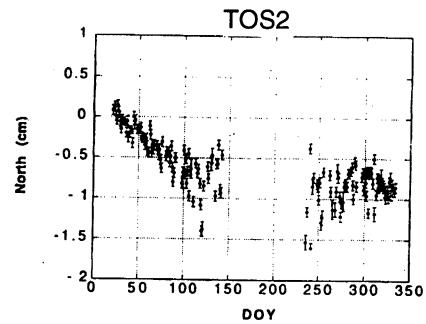


Fig.8(m)



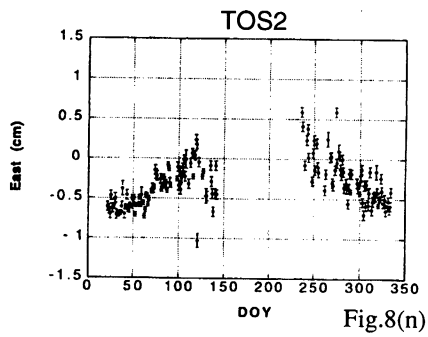
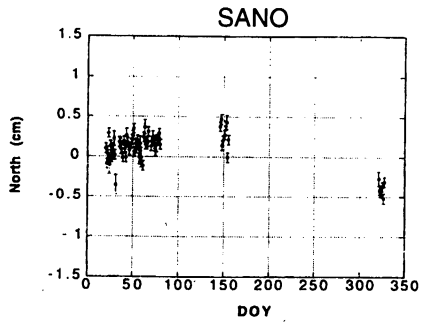


Fig.8(n)



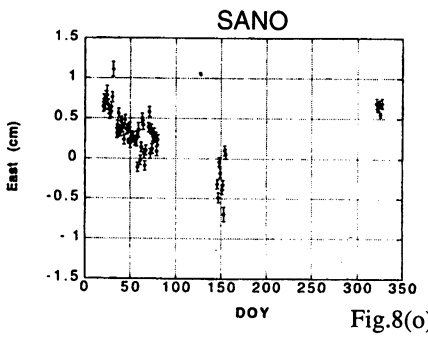


Fig.8(o)

Fig. 8. Temporal changes of horizontal coordinates at GPS observation sites; (m) Kyoto University (KYT__), (n) Hokudan-cho Town Office (HOK2), and (o) Tsuna (SANO). Horizontal axis is the Julian date since the first date of 1995 (after Nakano, 1996).

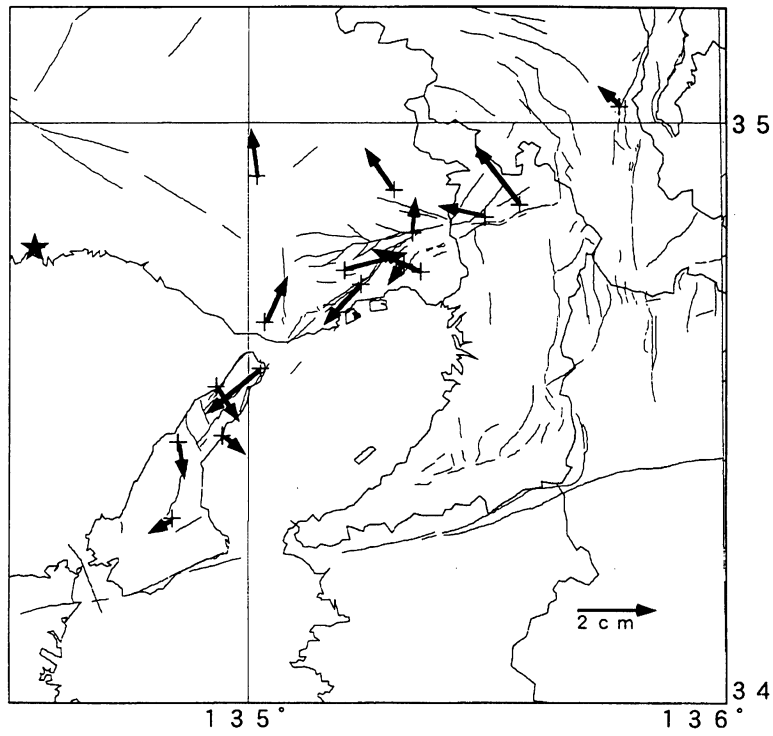


Fig. 9. Distribution of the post-seismic displacements at GPS sites (Nakano, 1996)

(b) 余効変動のメカニズム

地震の余効変動はその多くが時間と共に漸減するような変動であるが，その時間定数にはいろいろなものが知られている．地震直後に見られる時定数が1日程度の短期の余効変動はひずみ計などの連続記録に捉えられることがあり，「スローアースクウェーク」などと呼ばれている（例えば Kawasaki *et al.*, 1995）．これより長い数十日以上の時定数を持つ余効変動は測地測量によって数多く捕らえられ，様々なメカニズムが提唱されている．これらのうち，数年以内の，特に海溝型巨大地震に伴う余効変動については断層の下部延長方向へのスリップの伝播が有力な仮説として知られている（例えば，Thatcher and Rundle, 1979; Kasahara and Kato, 1980）．1994年12月「三陸はるか沖地震」の後の約1年間にわたって観察された余効変動は断層面上で変位が進行したとされ，「スローアースクウェーク」と解釈されている（Heki *et al.*, 1997）．これより長い，数十年にわたる長期の余効変動については上部マントルの粘弾性的緩和が考えられている（例えば，Thatcher and Rundle, 1979; Thatcher *et al.*, 1980）．

どのような時定数をとるにせよ，一般的に地震の余効変動の考えられるメカニズムとしては（1）地殻・上部マントルの粘弾性的緩和，（2）断層面上の余効的スリップ，（3）断層周囲へのスリップの伝播などが考えられる．どのメカニズムを仮定するかによってモデル関数も変わってくる．Shen *et al.*（1994）は Landers 地震の余効変動に，指数関数，対数関数，べき乗関数，の3種の曲線近似をあてはめたが，データからどれが最適かを分離することはできなかったとしている．Nakano（1996）も

Shen *et al.*（1994）と同様の試みを行っているがやはり，どれもにたような結果となっている．

兵庫県南部地震の場合，仮に余効変動が地殻・上部マントルでの地震時にかかった応力の粘弾性的緩和過程を表出しているものと考えて指数関数で近似すると，例えば顕著な余効が観測されている岩屋（IWAY）・瓦木（KWRG）ではその時定数は約50日となる．これはShen *et al.*（1994）によるLanders地震の場合の推定値とほとんど同じである．このような地殻・上部マントルの粘弾性的な緩和は，もしあるとすれば，震源領域全体にわたる系統的な変動パターンとして観察されるはずであろう．しかしながら，Figure 9をみると今回の地震の場合，余効変動が断層の近傍に限られており，また地震時変位と同じ方向を向いている観測点が多い．このことから上述のような粘弾性的な変形は考えにくい．むしろ，断層面上あるいはその周辺での余効的スリップの可能性を示唆しているように思われる．

断層面上の余効的活動と考えた場合，例えば余震活動と何らかの関係があるものと考えることもできよう．余効変動の時間的推移が余震数の減衰過程に似ていることから，例えば大森公式と同じようなべき乗則があてはまることが考えられる．そこで，余効変動$P(t)$を次式のようなべき乗関数によって近似することを試みた（Nakano, 1996）．

$$P(t) = D\{(t-t_{eq})/\tau_p\}^{1-p} + V(t-t_{eq}) + \varepsilon$$

ここで，Dは余効変動の振幅を決めるパラメータ，Vは定常的な変位速度，τ_pは特性緩和時間，pはべき乗則のインデックス，t_{eq}は地震発生時刻，εは残差である．余震数の減衰の時系列からはpはおよそ1に近い値であり，兵庫県南部地震の場合は1.1と求められている（統計数理研究所・東京大学地震研究所，1995）．特性緩和時間τ_pを50日として上式を余効変動の岩屋のデータにあてはめた場合$p=1.11$が得られ，余震数の減衰過程とよい調和を示す（Nakano and Hirahara, 1997）．但し，余震数の減衰過程（大森公式）と余効変動の累積過程を直接結びつけることはできないので，ここでは単に余効の過程が何らかのべき乗則であらわされる物理法則で支配されている可能性がある，ということを指摘しておきたい．

また，仮に余効変動が余震の際の変位の累積であると仮定して，余震をマグニチュード・モーメントの関係式を用いて等価な地表変位に直すと，その累積量はおよそ8 mmであることが予想され，観測された余効変動を説明するのには充分ではない．従って，観測された余効変動は単なる余震による地殻変動の影響ではなく，何らかの非地震性の過程をとらえているものと考えられる（Nakano and Hirahara, 1997）．

それでは，余効変動が単なる余震の影響だけでなく，断層面上に非地震性のすべりが地震後も続いたのだと考えるとどのようなことが分かるのだろうか．このような考え方を岩石破壊実験の結果に基づいて断層の摩擦構成則にのっとって説明しようとする試みがある（例えばScholz, 1990; Marone *et al.*, 1991）．Marone *et al.*（1991）は，地殻の表層部は，より深部の地震発生層と異なり，破壊速度の増加と共に断層面が硬化するいわゆる速度硬化層（velocity-strengthning region）になっていると考えている．このような層では地震発生時には破壊が進行すると共によりすべりにくくなるので，結果として地震時に充分応力が解放されない．この残留応力が地震後の応力緩和過程によって解放され，余効変動を生じることが示される．このような場合地表変位$U_p(t)$は自然対数を用いた次の式で近似される．

$$U_p(t) = \alpha ln\{(\beta/\alpha)t+1\} + V_0 t$$

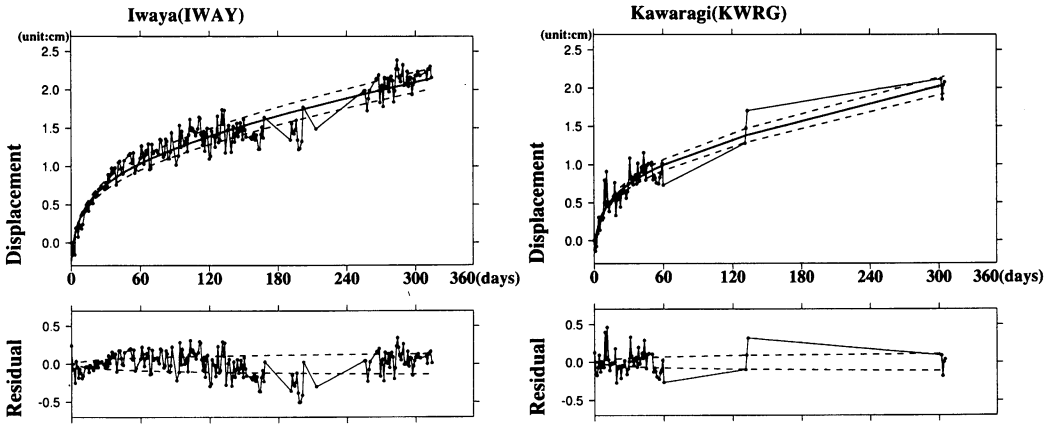


Fig. 10 (a). Least-squares fitting of the post-seismic displacements at Iwaya site (IWAY) by the logarithmic function. Residuals are also shown in the lower figure. Dashed lines are the cases when α in equation (2) is changed with amount of ±10% of the best fitted one. Horizontal axis is the days from the first day of the observation.
Fig. 10 (b). Least-squares fitting of the post-seismic displacements at Kawaragi site (KWRG) by the logarithmic function. Residuals are also shown in the lower figure. Dashed lines are the cases when α in equation (2) is changed with amount of ±10% of the best fitted one. Horizontal axis is the days from the first day of the observation.

Table 3. Estimated parameters; α, β and V_0, by the least-squares fitting of the logarithmic curve to the post-seismic displacements at Iwaya (IWAY) and Kawaragi (KWRG).

	Iwaya (IWAY)	Kawaragi (KWRG)
α (cm)	0.314	0.264
β (cm/day)	0.192	0.167
V_0 (cm/yr)	0.858	0.923

ここで，$\alpha=(a-b)\sigma_n\, h/G$ で $a-b$ は断層の構成パラメータ（constitutive parameter），σ_n は断層面に垂直な応力の深さ方向の増加率（effective normal stress gradient）（およそ 15 MPa/km 程度），G は地殻の剛性率（およそ 10 GPa 程度），h は速度硬化層の厚さ，また β は速度硬化層の中での平均的な地震時変位速度，V_0 は定常的な変位速度である．従って，この式を余効変動の曲線にあてはめて α を推定することで摩擦速度パラメータ（$a-b$）と h が積の形に求められる．$a-b$ は断層のスリップ様式を規定する重要なパラメータであり，これが正の時は速度硬化を引き起こし，負の時は速度軟化を引き起こす．前者が表層の非地震発生層に対応し，後者が地震発生層に対応すると考えられる．この式を非線形最小二乗近似によって岩屋と瓦木観測点にあてはめた例を Figure 10 (a) と Figure 10 (b) に示す．また，各推定パラメータを Table 3 にまとめておく．Figure 10 ではそれぞれの最大変位の方向に投影した変位の量でプロットしてある．Table 3 に示したように，岩屋の場合 $\alpha=0.314$ cm，瓦木の場合 $\alpha=0.264$ cm であり，これらから断層近傍の構成パラメータ $a-b$ を推定することができる．なお，ある程度の誤差を考慮して，対数曲線のあてはめに敏感な量 α を最適値から 10 % だけ増減させた場合の曲線を同図に破線で示す．α はこの程度変化しうると考えてよいであろ

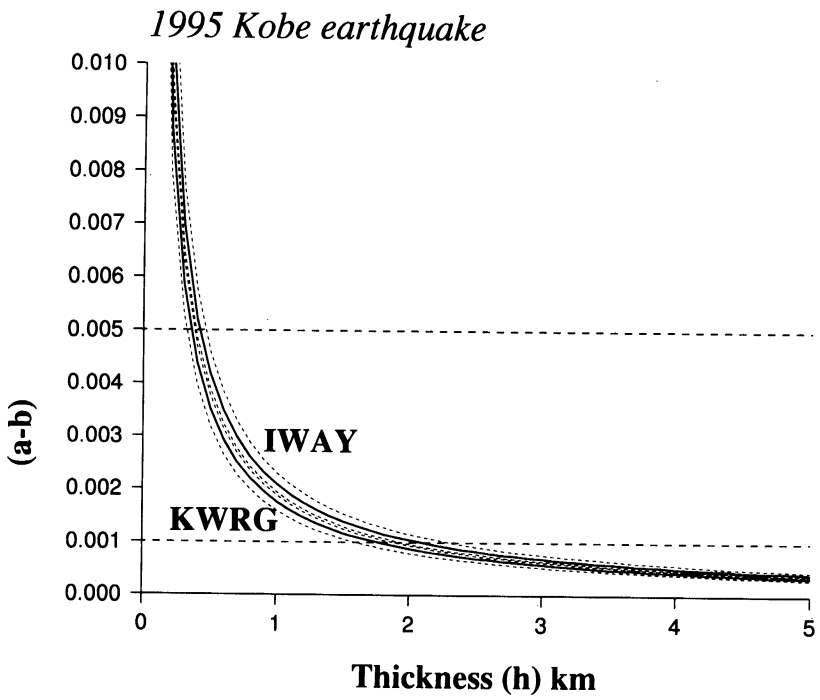


Fig. 11. Constitutive parameter $(a-b)$ vs. the thickness of the velocity-strengthning layer (h). Laboratory experiments suggests that $(a-b)$ is in the range from 0.001 to 0.005 which are drawn by the dashed horizontal lines.

う．$(a-b)h$ の曲線を Figure 11 に示す．岩石破壊実験からは速度硬化層内では $a-b$ が 0.001～0.005 程度であることが示唆されており（Marone *et al.*, 1990），このことから速度硬化層の厚さは 500 m～2 km 程度と見積もられる．Hirata *et al.*（1996）や京都大学防災研究所（1995）によれば，余震分布からは深さ 2～3 km 程度より浅いところでは余震の発生が極めて少ないことが知られていて今回の結果と調和的といってよいであろう．岩屋は野島断層の最大変位を示した場所よりは少し北に位置しており，地震直後には応力が地表付近で大きかったとしても不思議ではない．一方，瓦木は断層面の変位が既にかなり小さくなった断層北端部であり，地震時に大きな応力増加があったとも思えないが，この周辺はもともと堆積層の厚いいわゆる“震災の帯”の中にあり，そのことが表層部での応力増加に関係しているのかもしれない．$a-b$ にしても h にしてもそれほど厳密に求められているわけではないので，詳しい議論はできないが，それほど見当違いの値ではないだろう．今後，余効変動の詳しい時間－空間分布が多くの地震について知られれば，それらは岩石物性や地殻上部構造の推定に有効に用いられる可能性があることを指摘しておきたい．

もう一つのパラメータ β は岩屋の場合 0.192 cm/day，瓦木で 0.167 cm/day となる．これは地震時の変位速度の推定値を与えるが，Marone *et al.*（1991）によれば地震直後数時間～半日以内から観測が行われていないと正確な推定値が与えられないとしている．また，V_0 は岩屋で 8.6 mm/yr，瓦木で 9.2 mm/yr となった．不動とした御津（MITU）基準点が比較的近いことを考えるとこれらの値は少し大きいようにも思われる．これらの数値の考察は別の機会にゆずりたい．

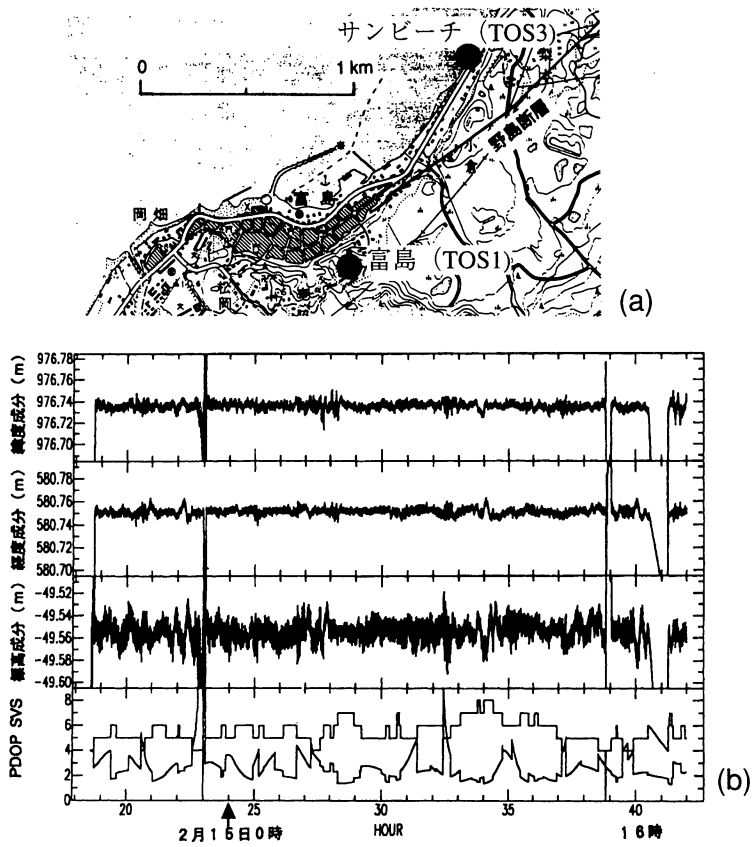


Fig. 12. (a) Baseline of RTK-GPS crossing the Nojima fault, and (b) temporal change of baseline components from February 14 to February 15, 1995 (Hirahara et al., 1996).

今回の場合，明瞭な対数関数的遷移を示す観測点が岩屋と瓦木の2点のみであり，ここから断層面上の詳細な岩石物性分布を知ることはむつかしい．また，地震時変位速度βの推定を精度よく行うには地震直後からの観測が重要である．観測の立場から余効変動のより精細な時間空間的経過を追うためには，今回のような観測でもまだ十分でなく，今後余効変動から地震断層面上の物理的な特性を詳しく議論しようとするためには，より高密度（特に断層近傍）のアレイを地震直後から立ちあげるような努力をする必要があろう．

今回の地震の余効変動に関しては本稿で述べたGPSによるものの他，京都大学の六甲高雄観測室で観測されたひずみ計による余効変動も知られている（例えば藤森他，1995）．ひずみ計の記録を見ると，その時定数がほぼ50日程度であり，GPSの観測結果と調和的である．これらを組み合わせることにより余効変動のメカニズムについてより詳しいことが明らかになると期待される．

3.3 リアルタイムキネマティックGPSの応用

この地震が発生する以前から，リアルタイムキネマティックGPS（RTK-GPS）を地殻変動調査

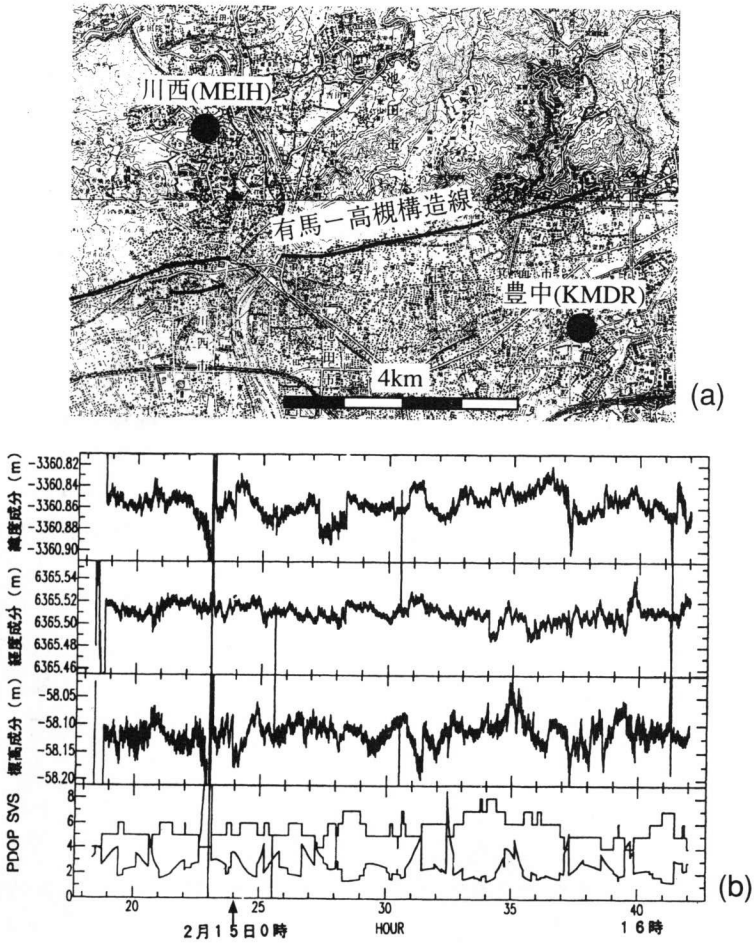


Fig. 13. (a) Baseline of RTK-GPS crossing the Arima-Takatsuki tectonic line, and (b) temporal change of baseline components from February 14 to February 15, 1995 (Hirahara et al., 1996).

に応用する可能性が議論されていた．そこで，本地震が発生したのを契機に試験的にRTK-GPSを実施することになった．

RTK-GPSは静止測量型のGPSと異なり，移動体の測位をリアルタイムでかつ高精度に行おうとするものである．いわゆる静止測量型のGPSもRTK-GPSも位相を用いる点では同じであるが，ここで用いているRTK-GPSはいわゆる整数不確定性（initial phase ambiguity）を除去する方式が，静止測量とは異なるOn-The-Fly（OTF）と呼ばれる方式で行われている（例えば辻井他，1997）．静止測量では長時間観測による衛星配置の移動を利用するのに比べ，OTFでは位相取得時の衛星の配置から異なる4衛星を取り出してそれらに基づいて整数不確定性を除去する．こうすることにより点間ベクトルを瞬時に求めることができるのでリアルタイムに相対位置を求めることができる．このためOTF方式によるRTK-GPSは特に移動体測位の分野で最近急速に導入が進みつつある．但し，この方法で2～3 cm以内の精度を得るには今のところ基線長が10 km程度以内と短い．そこで，短

基線で局所的な変動をリアルタイムに監視するのに有効に用いられる可能性がある．

以上の条件を考慮し，今回は淡路島の野島断層付近と有馬高槻構造線の2箇所に断層をまたぐように短距離基線を設置した．Figure 12 (a) は野島断層をまたぐ基線の拡大図で，東側の富島（TOS 1）と県民サンビーチ（TOS 3）の間の約 1.2 km 離れた2箇所に Ashtech 受信機を設置し，データを専用回線で京都大学防災研究所に伝送した．また有馬－高槻構造線をまたぐ基線では，北側の川西（MEIH）と南側の豊中（KMDR）の約7 km の基線に同様のシステムを設置した（Figur 13 (a)）．観測は2月10日頃から3月20日過ぎまで連続して実施し，1秒1回のサンプリング周期を用いた．受信側の京都大学防災研究所ではデータを電話線からモデムを介して PC に収録し Ashtech 社製の PNAV ソフトウェアによって RTK 処理を施し，即時に各点間の相対変位ベクトルを見ることを可能にした．また，位相データは磁気ディスクに格納し，データ取得後にオフライン処理を実施した．

Figure 12 (b)，Figure 13 (b)に示した記録例は2月 14〜15 日のものである．Figure 12 (b) の野島断層の短距離基線では．水平で 1 cm 程度，上下で 2 〜 3 cm 程度のばらつきにおさまっている．ただ．PDOP のプロットから分かるように，衛星配置が悪い時には不確定性がもとめられないためデータは極端に悪い．Figure 13 (b)の有馬－高槻構造線の基線は距離が 7 km 程度と RTK- GPS としては基線長が長いため．データのばらつきも大きく，1 〜 2 cm 程度の地殻変動を見い出すには分解能が不足していることが分かる．

RTK- GPS を実施した2月中旬から3月にかけてはすでに地震活動が低下し．有意な地殻変動のイベントを見いだすことはできなかった（Hirahara *et al.*, 1996）．しかしながら，基線変化をリアルタイムで監視するには RTK が有用であることが確かめられたことはたいへん重要といえよう．なお，宝塚周辺でも Trimble によるキネマティック GPS の観測が短期間行われたが，データの集積にとどまっている．

4. ま と め

兵庫県南部地震に際して「GPS 大学連合」は震源域近傍に 30 点以上にのぼる臨時の観測点を設置して余効変動の検出をはじめとする地殻変動の観測・研究を実施した．観測データを京都大学防災研究所に集めて総合的な解析を行ったほか，分担して様々な解析が実施された．

地震前後の GPS 観測データを解析して地震時の変位を明らかにした．変位量は野島断層に最も近い岩屋観測点で 45 cm 程度に達する．他の測地測量データと強震動データを含めた同時インバージョンによりこの地震時の変位はほぼ垂直な断層面上の右横ずれ断層運動によってよく説明される．

地震後の余効変動調査では野島断層近傍の岩屋観測点で最大約 3 cm に達する余効変動が見出されたほか，他の数点でも類似の余効変動が観測された．これらの余効変動は時間と共に漸減する余効変動もあるが，単純な時間推移をたどらない変動もある．この余効変動のメカニズムについての考察を行った．断層近傍の粘弾性的緩和，余震の影響，断層面上の余効スリップなどの考え方を検討した．特に顕著な余効変動を示す岩屋と瓦木の観測点に指数関数，対数関数，べき乗関数の3種類をあてはめたが，いずれも 50 日程度の時定数（あるいは特性緩和時間）を示し，関数形だけからではどのメカニズムが最適かは判別できなかったが，余効変動の空間分布などを考慮すると，断層面上かその周囲の余効的なスリップがその原因と考えられる．地表近くの速度硬化層の地震後のすべりと考えて岩石破壊実験に基づく理論式を岩屋と瓦木にあてはめた．この際得られるパラメータ α から断層の構成パラメータ $a-b$ と表層部 h の厚さが積の形で求められ，岩石実験で得られている $a-b$ の値を与え

ることにより h は500 m～2 kmと余震の深さ分布の結果などと調和的な値が得られた．

また，本臨時観測では，世界ではじめてリアルタイムキネマティックGPS（RTK-GPS）を断層運動の監視のために用いた．観測期間内に有意な変位は観測されなかったが，今後このような観測方式はリアルタイムの地殻変動監視には有効であろうと考えられる．

謝　　辞

本研究は，地震後の混乱のさなかにも関わらず，協力を惜しまなかった下記の方々なしには，なしえなかったものである．改めて深い感謝の意を表したい．

大阪府豊中市北緑が丘　豊中市立北緑が丘小学校
兵庫県川西市荻原台　川西市立川西小学校
大阪府尼崎市田能　尼崎市立園和北小学校
兵庫県宝塚市玉瀬　玉瀬公民館
兵庫県津名郡淡路町　神戸大学臨海実験所
（1995年4月より神戸大学内海域機能教育研究センター）
兵庫県津名郡北淡町　淡路島簡易保険保養センター
兵庫県津名郡北淡町　北淡町役場
兵庫県津名郡北淡町　県民サンビーチ
兵庫県三原郡緑町　組合立広田小学校
徳島県鳴門市大麻町　鳴門市立堀江北小学校
兵庫県神戸市灘区　神戸市立六甲牧場
兵庫県宝塚市川面　宝塚市立宝塚小学校
兵庫県西宮市神園町　夙川学院中学校
兵庫県西宮市大屋町　西宮市立瓦木小学校
兵庫県神戸市須磨区　兵庫県立須磨友が丘高等学校
兵庫県津名郡津名町　佐野文化会館
兵庫県津名郡一宮町　淡路文化会館
京都府亀岡市本梅町　西加舎公民館
大阪府豊能郡豊能町　豊能町立東ときわ台小学校
兵庫県神戸市東灘区　神戸商船大学
兵庫県神戸市北区　神戸市淡河環境センター
兵庫県三木市口吉川　三木市農協口吉川支店
兵庫県宝塚市武庫川町　宝塚ファミリーランド

観測やデータ解析においては，国土地理院の関係の方々から多くの情報や助言を頂いた．観測に際しては東京大学地震研究所村田一郎教授，大学院学生の青木陽介，Wedyanto Kuntojoro，藤巻ひろみの諸君及び地震研究所に滞在中の日本学術振興会外国人特別研究員Sungat Altis氏にお世話になった．京都大学防災研究所田中寅夫教授には研究推進のために多大なご支援を頂いた他，原稿を見て下さって有益な指摘をして頂いた．余震に関する情報の取得には東京大学地震研究所平田直助教授に，また研究者間の電子メールによる連絡については同研究所鷹野澄助教授にご協力頂いた．緊急の事態に際して様々な連絡・調整，観測の準備，事務手続き等で各大学の事務・技官の方々にお世話になったほか，テレメータ用電話回線の迅速な敷設には日本電信電話株式会社にご協力を頂いた．また，京都大学防災研究所橋本学助教授及び匿名の査読者には本論文について大変有益な助言を頂いた．こ

れらの方々に深く感謝する.

本研究は「平成7年兵庫県南部地震緊急地殻活動調査」(平成6年度文部省地震予知研究経費；研究代表者 平田直)，平成7年度文部省科学研究費総合研究(A)(「平成7年兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証」；研究代表者 藤原悌三) 及び地震予知研究計画事業費(「GPS総合観測」) によって実施された.

参 考 文 献

Bilham, R. (1989): Surface slip subsequent to the 24 November 1987 Superstition Hills, California, earthquake monitored by digital creepmeters, Bull. Seismol. Soc. Am., **79**, 424-450.

Bucknam, R.C., G. Plafker, and R. V. Sharp (1978): Fault movement [afterslip] following the Guatemala earthquake of February 4, 1976, Geology, **6**, 170-173.

Catane, J. P. L. (1995): Assessment of Global Positioning System measurements in monitoring and resolving relative motion along faults, Ms Thesis, 103pp.

地質調査所 (1980):石廊崎地震断層の余効的変動，地震予知連絡会報，**24**，128-131.

Fitch, T. J. and C. H. Scholz (1971): Mechanism of underthrusting in southwest Japan: a model of convergent plate interactions, J. Geophys. Res., **76**, 7260-7292.

藤森邦夫・山本剛靖・石井紘 (1995): 1995年兵庫県南部地震に関連した地殻変動と湧水量変化－六甲高雄観測室における観測－，月刊地球，号外 No.**13**, 148-153.

GPS 大学連合 (1995a): 兵庫県南部地震における GPS 観測結果，地震予知連絡会報，**54**，640-648.

GPS 大学連合 (1995b): 兵庫県南部地震における GPS 観測成果，地震予知連絡会報，**54**，649-658.

GPS 大学連合[平原和朗] (1995): GPS 観測によって捉えられた 1995 年兵庫県南部地震の余効変動，月刊地球，号外 No. **13**, 153-162.

Hashimoto, M., T. Sagiya, H. Tsuji, Y. Hatanaka, and T. Tada, Coseismic displacements of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, J. Phys. Earth, **44**, 255-279, 1996.

Heki, K., S. Miyazaki and H. Tsuji, (1997): Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan trench, Nature, **386**, 595-597.

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 postseismic crustal movements in the focal region of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake - static and real-time kinematic GPS observation -, J. Phys. Earth, **44**, 301-315.

Hirata, N., S. Ohmi, S. Sakai, K. Katsumata, S. Matsumoto, T. Takanami, A. Yamamoto, T. Iidaka, T. Urabe, M. Sekine, T. Ooida, F. Yamazaki, H. Katao, Y. Umeda, M. Nakamura, N. Seto, T. Matsushima, H. Shimizu, and Japanese University Group of the Urgent Joint Observation for the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake (1996): J. Phys. Earth, **44**, 317-328.

鎌田高造 (1995): 全国 GPS 連続観測システムの今後の展望，GPS 研究会 (GPS シンポジウム1994) 集録，113-118.

Kasahara, K., and T. Kato (1980): Aseismic faulting following the 1973 Nemuro-oki earthquake, Hokkaido, Japan (a retrospective study), PAGEOPH, **119**, 392-403.

Kato, T., Y. Kotake, S. Nakao, Y. Hirata, T. Chachin, F. Kimata, K. Yamaoka, T. Okuda, H. Kumagai, K. Hirahara, T. Nakano, T. Terashima, J. P. L. Catane, A. Kubo and T. Matsushima (1996): Post-seismic crustal deformation associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake derived from GPS observation - preliminary analysis of Trimble data-, J. Phys. Earth, **44**, 287-299.

Kawasaki, I., Y. Asai, Y. Tamura, T. Sagiya, N. Mikami, Y. Okada, M. Sakata, and M. Kasahara (1995): The 1992 Sanriku-Oki, Japan, ultra-slow earthquake, J. Phys. Earth, **43**, 105-116.

京都大学防災研究所 (1995): 兵庫県南部地震の余震分布の高精度再決定，地震予知連絡会会報，**54**，612-614.

Marone, C., C. B. Raleigh, and C. H. Scholz (1990): Frictional behavior and constitutive modeling of simulated fault gough, J. Geophys. Res., **95**, 7007-7025.

Marone, C. J., C. H. Scholz, and R. Bilham (1991): On the mechanics of earthquake afterslip, J. Geophys. Res., 96, 8441-8452.

名古屋大学理学部，神戸大学理学部，国土地理院 (1995): 兵庫県南部地震に伴う神戸大学 GPS 基点の変動，地震予知連絡会報，**54**，691-694.

Nakano, T. (1996): Postseismic deformation following the Hyogo-ken Nanbu earthquake observed with GPS , MS thesis dissertation, Kyoto University.

Nakano, T., and K. Hirahara (1997): Postseismic deformation following the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan, observed with GPS , Geophys. Res. Let., **24**, 503-506.

中田高，蓬田清，小高潤一郎，坂本晃章，朝日克彦，千田昇 (1995): 1995 年兵庫県南部地震の地震断層，地学雑誌，**104**, 127-142.

大阪管区気象台・気象庁地震予知情報課 (1995): 1995 年兵庫県南部地震とその余震活動，地震予知連絡会報，**54**，584-592.

Rothacher, M., G. Beutler, W. Gurtner, E. Brockmann, L. Mervart (1993): Bernese GPS Software Version 3.4, Documentation May 1993, 266pp.

Scholz, C. H. (1990): The mechanics of earthquakes and faulting, Cambridge University Press, 314-317.

Scholz, C. H. and T. Kato (1978): The behavior of a convergent plate boundary: crustal deformation in the south Kanto district, Japan, J. Geophys. Res., **83**, 783-797.
嶋本利彦（1995）: "震災の帯" の不思議，科学，**65**，195-198.
Sharp, R. V., K. E. Budding, J. Boatwright, M. J. Ader, M. G. Bonilla, M. M. Clark, T. E. Fumal, K. K. Harms, J. J. Lienkaemper, D. M. Morton, B. J. O'Neill, C. L. Ostergren, D. J. Ponti, M. J. Rymer, J. L. Saxton, and J. D. Sims (1989): Surface faulting along the Superstition Hills fault zone and nearby faults associated with the earthquakes of 24 November 1987, Bull. Seismol. Soc. Am., **79**, 252-281.
Shen, Z.-K., D. D. Jackson, Y. Feng, M. Cline, M. Kim, P. Fang, and Y. Bock (1994): Postseismic deformation following the Landers earthquake, California, 28 June 1992, Bull. Seismol. Soc. Am., **84**, 780-791.
Smith, S. W., and M. Wyss (1968): Displacement on the San Andreas fault subsequent to the 1966 Parkfield earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., **58**, 1955-1973.
Tabei, T., T. Kato, J. P. L. Catane, T. Chachin, K. Fujimori, K. Hirahara, A. Kubo, T. Matsushima, T. Nakano, S. Nakao, S. Otsuka, T. Terashima, and T. Yamamoto (1996): Crustal deformation associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan, derived from GPS measurements, J. Phys. Earth, **44**, 281-286 .
寺島敦（1995a）: 兵庫県南部地震，救急医学，**19**，4-12.
寺島敦（1995b）: 兵庫県南部地震の発生，大震災100日の軌跡，神戸大学<震災研究会>編，9-34.
Thatcher, W., and J. B. Rundle (1979): A model for the earthquake cycle in underthrust zones, J. Geophys. Res., **84**, 5540-5556.
Thatcher, W., J. B. Rundle, T. Matsuda, and T. Kato (1980): Lithospheric loading by the 1896 Riku-u earthquake, northern Japan: implications for plate flexure and asthenospheric rheology, J. Geophys. Res., **85**, 6429-6435.
統計数理研究所，東京大学地震研究所（1995）: 兵庫県南部地震の余震活動度の準リアルタイム監視－1月25日23時16分M4.7余震の事前予測－，地震予知連絡会会報，**54**，600-607.
辻井利昭・張替正敏・村田正秋（1997）：キネマティックGPSソフトウェアKINGSの開発と伊豆諸島地域の地殻変動観測への適用，測地学会誌，**43**，91-105.
Williams, P. L., and H. W. Magistrale (1989): Slip along the Superstition Hills fault associated with the 24 November 1987 Superstition Hills, California, earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., **79**, 390-410.
Yoshida, S., K. Koketsu, B. Shibazaki, T. Sagiya, T. Kato, and Y. Yoshida (1996): Joint inversion of near- and far-field waveforms and geodetic data for the rupture process of the 1995 Kobe earthquake, J. Phys. Earth, **44**, 437-454.