広帯域地震観測

— 防災科研 F-net の 10 年 —

(独)防災科学技術研究所地震研究部*

松本拓己・堀 貞喜・松林弘智

Broadband Seismic Observation — NIED F-net —

Takumi MATSUMOTO, Sadaki HORI,
and Hirotooshi MATSUBAYASHI

National Research Institute for Earth Science and Disaster
Prevention, 3-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan

(Received April 24, 2008; Accepted December 22, 2008)

After the disastrous 1995 Kobe earthquake, a new national project has started to drastically improve seismic observation systems in Japan. This project was requested to construct a broadband seismograph network with a spacing of 100 km covering the whole of Japan utilizing existing broadband stations as much as possible. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) has constructed a new broadband seismograph network consisting of 73 stations called NIED F-net. The broadband seismograph (STS-1/2) and strong motion velocity-type seismograph (VSE-355G2/G3) are installed in 30 to 50 m long vaults at each F-net station. All the data obtained from the F-net are archived at NIED and provided to researchers and general public through the Internet. The NIED F-net has been routinely analyzing moment tensor solutions for earthquakes of magnitude greater than 3.5 based on the unified hypocenter catalog maintained by the Japan Meteorological Agency. High quality data provided from the dense F-net are utilized to address a lot of interesting research issues: seismogenic stress field, the source process of large earthquakes, structure of the Earth's interior, Earth's background free oscillations, and very low frequency earthquakes.

Key words: Broadband, NIED F-net, Moment tensor solution, Very low frequency earthquake

§ 1. はじめに

実際の地震波は、震源域での破壊様式や伝播経路の影響を受け、極めて多様な様相を呈している。従って、地震の震源過程や地球内部構造の解析を高精度に行うためには、地震波に含まれる情報の欠損を最小限にする

べく、地動をできるだけ忠実に記録した高品質な地震波形データが不可欠である。1970 年代後半から主流となってきた、デジタル地震波形データを利用した研究が、1980 年代後半以降急速な発展を遂げてきた背景には、広帯域地震計の開発と観測網への実装等による観測技術の進展があった。1980 年代半ばからは地球規模のデジタル地震計観測網が各国独自に構築・運用されてきたが [例えば Roult and Romanowicz (1984) や Agnew *et al.* (1986)], 現在では米国の IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) が中心となって、自身が運用している GSN (Global Seismographic Network) と共に地球の全域に観測点が配置されている FDSN (Federation of Digital broadband Seismograph Network) 等の観測網の主要なデータを統合し、公開を行っている。また、こうした地球規模の観測網とは別に、ローカルかつ稠密な広帯域地震計の観測網 (例えば Berkeley Digital Seismic Network : BDSN, the German Regional Seismic Network : GRSN) が整備されている。

日本では、1980 年代から広帯域地震計を用いた観測が行われるようになってきたが [例えば山田・他 (1989), 堀 (1990)], 防災科学技術研究所 (防災科研) が 1994 年に開始した FREESIA Project (地震素過程と地球内部構造に関する総合的研究 : Fundamental Research on Earthquakes and Earth's Interior Anomaly) [福山・他 (1996)] により、広帯域地震計による観測網の全国展開が推進されることとなった。FREESIA Project は、新たに構築された観測網から得られる広帯域かつ高ダイナミックレンジのデータを活用することにより、震源過程、地殻・上部マントルの微細構造、地球深部の構造に関する研究を目的としたものであるが、この Project で整備された観測網から得られたデータは、(現在では当然のこととなっているが) ウェブサイトからのダウンロードや電子メールでの配布サービスにより、広く全世界の研究者に供せられ、この研究分野の進展に多大な貢献をしてきた。

その後、1995 年の阪神・淡路大震災を契機に発足した政府の地震調査研究推進本部は、1997 年 8 月 29 日に「地震に関する基盤的調査観測計画」を決定した [地震調査研究推進本部 (1997)]。本施策では地震防災対策の強化、とくに地震被害の軽減に資する総合的な調査観測計画の中核として「(1) 地震観測、(2) 地震動 (強震) 観測、(3) 地殻変動観測 (GPS 連続観測)、(4) 陸域及び沿岸域における活断層調査」の 4 項目にのぼる基盤的調査観測を推進することとされており、この中で防災科研は (1) および (2) を担当することとなった。(1) では「陸域における高感度地震計による地震観測」と「陸域における広帯域地震計による地震観測」が計画されており、前者

*〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1

Fig. 1. Broadband seismic station distribution of the NIED F-net (Full Range Seismograph Network of Japan) in Mar. 1998 and Mar. 2008.

については高感度地震観測網 (Hi-net) が新たに構築され [Okada *et al.* (2004), Obara *et al.* (2005), 汐見・他 (2009)] 現在に至っている。後者については従来の FREESIA Project で整備された広帯域地震観測網を引き継ぎ、拡充する形で日本全国の陸域に新たに広帯域地震観測網 (F-net: Full Range Seismograph Network of Japan) を整備・運用するに至った。本論文ではこのような経緯で誕生した F-net の約 10 年間のあゆみと成果、そして今後の展望について紹介する。

§ 2. F-net の概要

断層の破壊過程を精度よく把握するためには、震源を取り囲む方向に観測施設があり、かつその観測施設は地震の直達波を利用できる範囲にあることが望ましい。このため、水平距離で約 100 km 間隔の三角網を目安として日本全国に 100 点配備する計画が進められており [例えば Okada *et al.* (2004)], 2008 年 3 月現在、三成分広帯域地震計 (Streckeisen 社製 STS-1/2) と三成分速度型強震計 (東京測振社製 VSE-355G2/G3) を併設した 73 カ所の観測点 (Fig. 1) から成る広帯域地震観測網 (F-net) を整備・運用し、連続波形データの提供を実施している。全 73 観測点のうち 30 カ所については、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、九州大学、鹿児島大学の協力を得て、各国立大学法人の観測施設を共同利用することにより観測を行っている。STS-1 [Wielandt and Streckeisen (1982)] に代表される広帯域地震計は温度変化の影響を受けやすく、これを避けて精度の高い観測を行うために各観測点では奥行き 30 ~ 50 m 程度の横坑の最奥部に地震計を設置している (Fig. 2)。また、STS-1 または STS-2 の最大入力速度は約

Fig. 2. (a) Configuration of the F-net station. (b) Cartoon of station composition and data transmission flow at F-net station.

10 mm/s 程度であり、近地強震波形の解析には適さない。そこで速度型強震計 (初期には東京測振製 VSE-311, その後 VSE-355G2/G3) を併設し、広帯域かつ広ダイナミックレンジの観測を可能としている (Table 1)。なお、観測網の整備初期に設置した STS-1 については 20 年近くを経過して故障頻度が増大する傾向にあり、2007 年初頭には長期欠測を避けるための処置として、一部の観測点で、故障した STS-1 の代替として STS-2 への置き換えを実施している。

STS-1 設置観測点の中では高遠 (TTO) のように非常にノイズレベルの低い観測点もある反面、徳島 (ISI)、旭 (NAA) や既に移設した館山 (TYM) などはノイズレ

Table 1. NIED F-net station list.

観測点名	コード	緯度	経度	標高	地震計の種類と稼働期間		収録機器	稼働期間
					広帯域地震計	速度型強震計		
阿武山	ABU	34.8635N	135.5706E	138m	STS-1 1998/03/28 -	VSE-311R VSE-355G2 1998/03/28-2002/08/28 2002/08/29 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1998/03/28 - 2003/03/11 2003/03/12 - 2008/02/04 2008/02/05 -
赤泊	ADM	37.9046N	138.4303E	276m	STS-2 2002/03/14 -	VSE-355G2 2002/03/14 -	MS-2000H HKS9200-H	2002/03/14 - 2007/11/12 2007/11/13 -
奄美大島	AMM	28.1571N	129.3001E	12m	STS-1 1999/03/20 -	VSE-355G VSE-355G3 1999/03/20 - 2005/02/28 2005/03/01 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1999/03/20 - 2003/02/12 2003/02/13 - 2008/02/14 2008/02/15 -
青ヶ島	AOG	32.4508N	139.7740E	84m	STS-2 2002/06/14 -	VSE-355G2 2002/06/14 - 2007/05/09 2007/05/10 -	MS-2000H HKS9200-H	2002/06/14 - 2008/01/31 2008/02/01 -
足尾	ASI	36.6342N	139.4206E	664m	STS-2 2001/03/17 -	VSE-355G2 2001/03/17 - 2004/12/08 2004/12/09 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2001/03/17 - 2002/12/18 2002/12/19 - 2007/11/04 2007/11/05 -
富士川	FUJ	35.2307N	138.4181E	618m	STS-1 1996/06/22 -	VSE-311R VSE-355G2 1996/06/22 - 2003/06/04 2003/06/05 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1996/06/22 - 2003/06/17 2003/06/18 - 2007/12/05 2007/12/06 -
福江	FUK	32.7177N	128.7572E	75m	STS-1 1999/02/27 -	VSE-355G VSE-355G3 1999/02/27 - 2005/02/23 2005/02/24 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1999/02/27 - 2003/02/10 2003/02/11 - 2008/01/21 2008/01/22 -
五城目	GJM	39.9555N	140.1113E	105m	STS-1 1997/11/22 -	VSE-311R VSE-355G2 1997/12/07 - 2002/07/30 2002/07/31 - 2005/12/04 VSE-355G3 2005/12/05 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1997/11/22 - 2003/05/20 2003/05/21 - 2007/11/26 2007/11/27 -
日高	HID	42.8208N	142.4145E	229m	STS-2 2000/12/29 -	VSE-355G2 2000/12/29 - 2005/11/16 2005/11/17 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2000/12/29 - 2003/04/30 2003/05/01 - 2007/10/22 2007/10/23 -
八丈	HJO	33.1048N	139.8024E	85m	STS-2 2002/02/07 -	VSE-355G2 2002/02/07 - 2005/02/13 2005/02/14 -	MS-2000H HKS9200-H	2002/02/07 - 2008/01/28 2008/01/29 -
広野	HRO	37.2246N	140.8777E	615m	CMG-3T 2000/05/20 - 2000/09/04 CMG-1T 2000/09/05 - 2002/09/25 STS-2 2002/09/26 -	VSE-355G VSE-355G3 2000/05/20 - 2005/01/11 2005/01/12 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2000/05/20 - 2003/04/08 2003/04/09 - 2007/12/12 2007/12/13 -
札幌	HSS	42.9672N	141.2286E	195m	STS-1 1996/09/14 -	VSE-311R VSE-355G2 1996/09/14 - 2003/06/06 2003/06/07 - 2005/06/27 VSE-355G3 2005/06/28 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1996/09/14 - 2003/06/06 2003/06/07 - 2007/10/31 2007/11/01 -
石垣	IGK	24.4131N	124.1808E	77m	CMG-3T 2000/05/18 - 2002/01/09 CMG-1T 2002/01/10 - 2002/07/15 STS-2 2002/07/16 -	VSE-355G VSE-355G3 2000/05/18 - 2006/07/06 2006/07/07 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2000/05/18 - 2003/02/03 2003/02/04 - 2007/12/03 2007/12/04 -
今金	IMG	42.3928N	140.1406E	80m	CMG-3T 2000/03/10 - 2000/10/31 CMG-1T 2000/11/01 - 2002/09/02 STS-2 2002/09/03 -	VSE-355G VSE-355G3 1999/12/17 - 2005/07/04 2005/07/05 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2000/03/10 - 2003/06/17 2003/06/18 - 2007/10/11 2007/10/12 -
中津	INN	33.4701N	131.3062E	168m	STS-2 2001/02/24 -	VSE-355G2 2001/02/24 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2001/02/24 - 2003/02/27 2003/02/28 - 2008/01/23 2008/01/24 -
徳島	ISI	34.0606N	134.4554E	27m	STS-1 1996/03/09 -	VSE-311R VSE-355G2 1996/03/09 - 2002/07/25 2002/07/26 - 2007/03/15 VSE-355G3 2007/03/16 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1996/03/09 - 2003/03/04 2003/03/05 - 2007/12/17 2007/12/18 -
山形	IYG	40.1217N	141.5833E	427m	CMG-3T 2000/01/20 - 2000/08/08 CMG-1T 2000/08/09 - 2002/06/23 STS-2 2002/06/24 -	VSE-355G VSE-355G2 1999/12/11 - 2003/10/27 2003/10/28 - 2004/12/20 VSE-355G3 2004/12/21 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1999/12/11 - 2002/11/18 2002/11/19 - 2007/10/22 2007/10/23 -
巖原	IZH	34.1359N	129.2066E	386m	STS-2 2001/02/17 -	VSE-355G2 2001/02/17 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2001/02/17 - 2003/02/09 2003/02/10 - 2008/01/24 2008/01/25 -
中伊豆	JIZ	34.9167N	138.9938E	263m	STS-1 1995/03/17 - 2007/03/26 STS-2 2007/03/27 -	VSE-311R VSE-355G2 1995/03/17 - 2002/09/17 2002/09/18 - 2006/06/01 VSE-355G3 2006/06/02 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1995/03/17 - 2003/03/23 2003/03/24 - 2007/12/17 2007/12/18 -
国領	KGM	26.7567N	128.2153E	102m	CMG-3T 2000/02/25 - 2000/08/31 CMG-1T 2000/09/01 - 2002/07/18 STS-2 2002/07/19 -	VSE-355G VSE-355G3 2000/02/25 - 2004/12/03 2004/12/04 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2000/02/25 - 2003/02/05 2003/02/06 - 2007/01/09 2007/01/10 -
紀和	KIS	33.8651N	135.8906E	70m	STS-1 1996/03/07 -	VSE-311R VSE-355G2 1996/03/07 - 2003/08/17 2003/08/18 - 2004/11/01 VSE-355G3 2004/11/02 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1996/03/07 - 2003/03/24 2003/03/25 - 2008/01/28 2008/01/29 -
上富田	KMT	33.6782N	135.4899E	152m	STS-2 2003/12/18 -	VSE-355G3 2003/12/19 -	MS-2000H HKS9200-H	2003/12/18 - 2007/12/03 2007/12/04 -
上梓白	KMU	42.2391N	142.9625E	185m	CMG-3T 2000/03/08 - 2000/10/24 CMG-1T 2000/10/25 - 2002/09/04 STS-2 2002/09/05 -	VSE-355G VSE-355G3 1999/12/28 - 2004/11/08 2004/11/09 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1999/12/28 - 2003/06/23 2003/06/24 - 2007/10/24 2007/10/25 -
金山	KNM	35.7168N	137.1781E	339m	STS-2 2001/04/14 -	VSE-355G2 2001/04/14 - 2005/01/06 2005/01/07 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2001/04/14 - 2003/01/13 2003/01/14 - 2007/11/28 2007/11/29 -
訓子府	KNP	43.7625N	143.7084E	158m	STS-2 2003/06/13 -	VSE-355G2 2003/06/13 - 2005/11/16 2005/11/17 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2003/06/13 - 2005/11/16 2005/11/17 -
金谷	KNY	34.8738N	138.0628E	260m	STS-2 2001/04/07 -	VSE-355G2 2001/04/07 - 2006/02/06 2006/02/07 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2001/04/07 - 2003/04/22 2003/04/23 - 2008/01/23 2008/01/24 -
川崎	KSK	38.2585N	140.5833E	320m	CMG-1T 2000/07/07 - 2002/08/01 STS-2 2002/08/02 -	VSE-355G VSE-355G3 2000/07/07 - 2005/07/06 2005/07/07 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2000/07/07 - 2002/11/25 2002/11/26 - 2007/11/19 2007/11/20 -
気仙沼	KSN	38.9762N	141.5301E	260m	CMG-3T 2000/02/11 - 2000/11/14 CMG-1T 2000/11/15 - 2002/09/25 STS-2 2002/09/26 -	VSE-355G VSE-355G3 2000/04/05 - 2005/07/25 2005/07/26 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2000/02/11 - 2003/04/10 2003/04/11 - 2007/11/14 2007/11/15 -
銅路	KSR	42.9820N	144.4851E	18m	STS-2 2002/12/12 -	VSE-355G2 2002/12/12 - 2004/12/13 2004/12/14 -	MS-2000H HKS9200-H	2002/12/12 - 2007/10/17 2007/10/18 -
永田	KYK	30.3781N	130.4099E	320m	STS-2 2001/02/02 -	VSE-355G2 2001/02/02 - 2007/04/05 2007/04/06 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2001/02/02 - 2003/02/24 2003/02/25 - 2008/02/07 2008/02/08 -
柏崎	KZK	37.2977N	138.5143E	250m	STS-1 1996/03/16 -	VSE-311R VSE-355G2 1996/03/16 - 2002/07/10 2002/07/11 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1996/03/16 - 2003/06/25 2003/06/26 - 2007/11/14 2007/11/15 -
神津島	KZS	34.2056N	139.1485E	192m	STS-2 2003/01/24 -	VSE-355G2 2003/01/24 - 2005/02/16 2005/02/17 -	MS-2000H HKS9200-H	2003/01/24 - 2008/01/21 2008/01/22 -
三蔵	MMA	41.1619N	140.4107E	90m	STS-2 2001/05/25 -	VSE-355G2 2001/05/25 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2001/05/25 - 2003/05/14 2003/05/15 - 2007/10/15 2007/10/16 -
旭	NAA	35.2239N	137.3622E	200m	STS-1 1997/02/22 -	VSE-311R VSE-355G2 1997/02/22 - 2002/08/27 2002/08/28 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1997/02/22 - 2003/01/15 2003/01/16 - 2007/11/12 2007/11/13 -
中川	NKG	44.8017N	142.0849E	31m	STS-2 2001/12/14 -	VSE-355G2 2001/12/14 - 2005/08/01 2005/08/02 -	MS-2000H HKS9200-H	2001/12/14 - 2007/10/24 2007/10/25 -
根室	NMR	43.3673N	145.7379E	20m	STS-1 1996/09/19 - 2007/03/15 STS-2 2007/03/16 -	VSE-311R VSE-355G2 1996/09/19 - 2002/09/12 2002/09/13 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	1996/09/19 - 2003/06/02 2003/06/03 - 2007/10/29 2007/10/30 -
野上	NOK	34.1656N	135.3478E	95m	STS-2 2001/01/13 -	VSE-355G2 2001/01/13 - 2007/09/04 2007/09/05 -	Q680 MS-2000H HKS9200-H	2001/01/13 - 2003/03/26 2003/03/27 - 2008/01/17 2008/01/18 -

Table 1. Continued.

観測点名	コード	緯度	経度	標高	地震計の種類と稼働期間			収録機器		稼働期間	
					広帯域地震計		速度型強震計				
西興部	NOP	44.3218N	142.9384E	126m	STS-2	2002/12/04 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2002/12/04 - 2008/05/22 2008/05/23 -	MS-2000H HKS9200-H	2002/12/04 - 2007/10/17 2007/10/18 -	2002/12/04 -
成羽	NRW	34.7682N	133.5325E	199m	CMG-1T STS-2	2000/05/12 - 2002/07/02 2002/07/03 -	VSE-355G VSE-355G3	2000/05/12 - 2006/06/14 2006/06/15 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2000/05/12 - 2003/03/06 2003/03/07 - 2008/01/29 2008/01/30 -	2000/05/12 -
錦	NSK	34.3403N	132.0018E	205m	STS-2	2001/04/21 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2001/04/21 - 2005/03/10 2005/03/11 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2001/04/21 - 2003/03/18 2003/03/19 - 2007/12/05 2007/12/06 -	2001/04/21 -
大川	OKW	33.8272N	133.4691E	828m	STS-1	2005/06/09 -	VSE-355G VSE-355G3	2005/06/09 - 2006/07/04 2006/07/05 -	MS-2000H	2005/06/09 -	2005/06/09 -
鬼石	ONS	36.1557N	138.9822E	477m	CMG-3T CMG-1T STS-2	1999/11/12 - 2000/11/21 2000/11/22 - 2002/06/18 2002/06/19 -	VSE-355G VSE-355G3	1999/11/12 - 2005/02/02 2005/02/03 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	1999/11/12 - 2002/12/19 2002/12/20 - 2007/11/21 2007/11/22 -	1999/11/12 -
小笠原	OSW	27.0983N	142.1961E	11m	STS-2	2002/03/05 -	VSE-355G3	2002/03/05 -	MS-2000H HKS9200-H	2002/03/05 - 2008/02/14 2008/02/15 -	2002/03/05 -
西郷	SAG	36.2553N	133.3050E	72m	STS-2	2002/02/22 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2002/02/22 - 2007/02/07 2007/02/08 -	MS-2000H HKS9200-H	2002/02/22 - 2008/02/04 2008/02/05 -	2002/02/22 -
青振	SBR	33.5052N	130.2530E	265m	STS-1	1999/02/06 -	VSE-355G VSE-355G3	1999/02/06 - 2005/02/23 2005/02/24 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	1999/02/06 - 2003/02/20 2003/02/21 - 2008/02/05 2008/02/06 -	1999/02/06 -
新発田	SBT	37.9683N	139.4501E	130m	STS-1	1997/12/13 -	VSE-311R VSE-355G2 VSE-355G3	1997/12/13 - 2002/08/20 2002/08/21 - 2007/12/06 2007/12/07 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	1997/12/13 - 2003/04/15 2003/04/16 - 2007/11/28 2007/11/29 -	1997/12/13 -
都留菅野	SGN	35.5096N	138.9444E	785m	STS-1	1995/03/17 -	VSE-311R VSE-355G2 VSE-355G3	1995/03/17 - 2002/09/19 2002/09/20 - 2008/10/02 2008/10/03 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	1995/03/17 - 2003/01/06 2003/01/07 - 2008/01/15 2008/01/16 -	1995/03/17 -
斜里	SHR	44.0563N	144.9944E	111m	STS-2	2001/12/21 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2001/12/21 - 2004/10/06 2004/10/08 -	MS-2000H HKS9200-H	2001/12/21 - 2007/10/11 2007/10/12 -	2001/12/21 -
紫尾山	SIB	31.9698N	130.3486E	659m	STS-2	2002/01/25 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2002/01/25 - 2006/02/26 2006/02/27 -	MS-2000H HKS9200-H	2002/01/25 - 2007/12/17 2007/12/18 -	2002/01/25 -
白峰	SRN	36.2018N	136.6303E	473m	STS-2	2002/11/13 -	VSE-355G2	2002/11/13 -	MS-2000H HKS9200-H	2002/11/13 - 2007/10/31 2007/11/01 -	2002/11/13 -
外海	STM	32.8870N	129.7237E	144m	STS-2	2003/01/30 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2003/01/30 - 2007/08/02 2007/08/03 -	MS-2000H HKS9200-H	2003/01/30 - 2008/01/15 2008/01/16 -	2003/01/30 -
田代	TAS	31.1946N	130.9093E	506m	STS-2	2001/01/20 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2001/01/20 - 2005/03/04 2005/03/05 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2001/01/20 - 2003/02/09 2003/02/10 - 2008/01/28 2008/01/29 -	2001/01/20 -
多賀	TGA	35.1846N	136.3382E	290m	STS-2	2001/04/21 -	VSE-355G2	2001/04/21 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2001/04/21 - 2003/03/17 2003/03/18 - 2007/12/10 2007/12/11 -	2001/04/21 -
玉川	TGW	33.9734N	132.9319E	300m	STS-2	2000/12/21 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2000/12/21 - 2005/02/06 2005/02/07 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2000/12/21 - 2003/03/09 2003/03/10 - 2007/12/10 2007/12/11 -	2000/12/21 -
高原	TKA	31.5160N	130.7830E	535m	STS-1	1996/03/15 - 2004/02/18	VSE-311R VSE-355G2 VSE-355G3	1996/03/15 - 2003/09/17 2003/09/18 - 2004/02/18 2004/02/19 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	1996/03/15 - 2003/02/17 2003/02/18 - 2004/02/18 2004/02/19 -	1996.3.15 - 2004/2/18
竹田	TKD	32.8176N	131.3873E	751m	STS-1	1996/03/09 - 2008/08/21	VSE-311R VSE-355G2 VSE-355G3	1996/03/09 - 2003/09/07 2003/09/08 - 2004/08/19 2004/08/20 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	1996/03/09 - 2003/02/25 2003/02/26 - 2007/01/09 2007/01/10 -	1996/03/09 -
高岡	TKO	31.8931N	131.2321E	82m	STS-2	2001/03/03 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2001/03/03 - 2007/01/22 2007/01/23 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2001/03/03 - 2003/02/19 2003/02/20 - 2007/12/19 2007/12/20 -	2001/03/03 -
稲用	TMC	32.6063N	130.9151E	285m	STS-2	2001/01/26 -	VSE-355G2	2001/01/26 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2001/01/26 - 2003/02/18 2003/02/19 - 2008/01/07 2008/01/08 -	2001/01/26 -
泊	TMR	41.1016N	141.3831E	120m	STS-1	1997/11/15 -	VSE-311R VSE-355G2	1997/12/04 - 2002/08/08 2002/08/09 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	1997/11/15 - 2003/04/03 2003/04/04 - 2007/10/09 2007/10/10 -	1997/11/15 -
西土佐	TSA	33.1781N	132.8200E	141m	CMG-3T CMG-1T STS-2	2000/03/23 - 2000/10/17 2000/10/18 - 2002/07/21 2002/07/22 -	VSE-355G VSE-355G3	2000/03/10 - 2005/02/08 2005/02/09 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2000/03/10 - 2003/03/13 2003/03/14 - 2008/01/15 2008/01/16 -	2000/03/10 -
つくば	TSK	36.2141N	140.0898E	174m	STS-1	2004/06/29 -	VSE-355G2	2004/06/29 -	MS-2000H HKS9200-H	2004/06/29 - 2007/09/27 2007/09/28 -	2004/06/29 -
高遠	TTO	35.8363N	138.1209E	1150m	STS-1	1999/04/10 -	VSE-355G VSE-355G3	1999/04/17 - 2005/03/22 2005/03/23 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	1999/04/10 - 2003/01/08 2003/01/09 - 2007/11/07 2007/11/08 -	1999/04/10 -
龍山	TYM	34.9745N	139.8449E	30m	STS-1	1995/03/22 - 2005/05/19	VSE-311R VSE-355G VSE-355G3	1995/03/22 - 2000/05/24 2000/05/25 - 2005/05/19 2005/05/20 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	1995/03/22 - 2003/05/09 2003/05/10 - 2005/05/19 2005/05/20 -	1995.3.22 - 2005/5/19
遠野山崎	TYS	39.3772N	141.5932E	346m	STS-2	2002/01/10 -	VSE-355G2	2002/01/10 -	MS-2000H HKS9200-H	2002/01/10 - 2007/10/24 2007/10/25 -	2002/01/10 -
馬路	UMJ	33.5795N	134.0367E	361m	CMG-3T CMG-1T STS-2	2000/03/25 - 2000/09/07 2000/09/08 - 2002/07/23 2002/07/24 -	VSE-355G VSE-355G3	2000/03/25 - 2005/02/08 2005/02/09 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2000/03/25 - 2003/03/11 2003/03/12 - 2008/01/28 2008/01/29 -	2000/03/25 -
浦幌	URH	42.9298N	143.6711E	75m	STS-1	1998/10/24 -	VSE-355G VSE-355G3	1998/10/24 - 2004/12/15 2004/12/16 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	1998/10/24 - 2003/06/10 2003/06/11 - 2007/10/15 2007/10/16 -	1998/10/24 -
輪島	WJM	37.4021N	137.0257E	201m	STS-2	2003/12/19 -	VSE-355G3	2003/12/19 -	MS-2000H HKS9200-H	2003/12/19 - 2007/11/19 2007/11/20 -	2003/12/19 -
度会	WTR	34.3739N	136.5748E	95m	STS-2	2001/04/07 -	VSE-355G2	2001/04/07 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2001/04/07 - 2003/03/19 2003/03/20 - 2007/01/09 2007/01/10 -	2001/04/07 -
弥栄	YAS	35.6570N	135.1605E	232m	STS-2	2001/03/24 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2001/03/24 - 2004/12/18 2004/12/19 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2001/03/24 - 2003/03/12 2003/03/13 - 2007/11/14 2007/11/15 -	2001/03/24 -
八溝	YMZ	36.9267N	140.2445E	520m	STS-1	1998/01/30 -	VSE-311R VSE-355G2 VSE-355G3	1998/01/30 - 2003/08/03 2003/08/04 - 2004/08/09 2004/08/10 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	1998/01/30 - 2002/12/24 2002/12/25 - 2007/11/07 2007/11/08 -	1998/01/30 -
与那国	YNG	24.4550N	123.0070E	84m	STS-2	2002/03/21 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2002/03/21 - 2005/09/03 2005/09/04 -	MS-2000H HKS9200-H	2002/03/21 - 2007/12/06 2007/12/07 -	2002/03/21 -
吉田	YSI	35.1942N	132.8862E	386m	STS-2	2001/03/30 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2001/03/30 - 2006/08/10 2006/08/11 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2001/03/30 - 2003/03/25 2003/03/26 - 2007/12/12 2007/12/13 -	2001/03/30 -
豊田	YTY	34.2835N	131.0364E	155m	CMG-3T CMG-1T STS-2	2000/02/18 - 2000/08/22 2000/08/23 - 2001/06/25 2001/06/26 - 2002/07/07 2002/07/08 -	VSE-355G VSE-355G3	2000/02/18 - 2005/06/20 2005/06/21 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2000/02/18 - 2003/03/26 2003/03/27 - 2008/01/17 2008/01/18 -	2000/02/18 -
山崎	YZK	35.0888N	134.4594E	328m	CMG-1T STS-2	2000/04/21 - 2002/06/30 2002/07/01 -	VSE-355G VSE-355G3	2000/04/21 - 2005/03/23 2005/03/24 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2000/04/21 - 2003/03/03 2003/03/04 - 2008/01/21 2008/01/22 -	2000/04/21 -
座間味	ZMM	26.2328N	127.3038E	22m	STS-2	2001/03/10 -	VSE-355G2 VSE-355G3	2001/03/10 - 2007/10/02 2007/10/03 -	O680 MS-2000H HKS9200-H	2001/03/10 - 2003/02/04 2003/02/05 - 2007/12/19 2007/12/20 -	2001/03/10 -

ベルがやや高い観測点となっている。また STS-2 設置観測点の長周期ノイズレベルの調査結果 [Widmer-Schmidrig *et al.* (2007)] によれば、F-net は GRSN に次ぐ低ノイズレベルの観測網と評価されている。しかしながら立地条件、地質条件等により個々の観測点によってノイズレベルの状態は様々である。金山 (KNM) や西興部 (NOP) など内陸部に位置する一部の観測点では非常にノイズレベルが低い状態であるが、青ヶ島 (AOG) や小笠原 (OSW) などの離島に設置された観測点は短周期・長周期ともにノイズレベルが高い状態となっている。

観測開始当初は、データ収録装置として Quanterra 社製 Q680 を使用した連続データのリアルタイム伝送と収集・蓄積を行っていた。2001 年以降はデータ収録装置を地球科学総合研究所 (JGI) 製 MS-2000H に換装し、WIN フォーマット [卜部・東田 (1992)] のヘッダ部を拡張した WIN32 フォーマットによりデータ伝送も含めて Hi-net と一体化したデータ収録システムとして運用している。なお、2007 年にはデータ収録装置が計測技研 (KGC) 製 HKS9200-H に置き換えられているが、仕様は JGI 製 MS-2000H と同等である。観測施設にて収録されたデータは、Hi-net のデータと同様、IP-VPN 網を介して防災科研及び気象庁にリアルタイムで配信されると共に、その他関係機関には東京大学地震研究所を経由して配信されている。また、韓国・台湾の関係機関とのデータ交換も実施されている [針生・他 (2007)]。IP-VPN 網による波形データ収集に関する詳細は松村・他 (2006)、汐見・他 (2009) を参照されたい。

防災科研に送られた連続波形データは 100 Hz サンプリング WIN32 形式のデータフォーマットで蓄積されると共に、20 Hz および 1 Hz サンプリング miniSEED 形式に変換される。データ収録装置に Q680 を使用していた期間については 80 Hz, 20 Hz, 1 Hz, 0.1 Hz, 0.01 Hz の多様なサンプリング周波数のデータを提供していたが、MS-2000H へ換装した後については、WIN32 形

式では 100 Hz サンプリングデータ、その他形式では 20 Hz と 1 Hz サンプリングデータのみを提供している (Table 2)。SEED, miniSEED, SAC, TEXT 形式による 20 Hz および 1 Hz サンプリングデータは F-net のウェブサイト (<http://www.fnet.bosai.go.jp/fnet/>) にて、WIN32 形式による 100 Hz サンプリングデータは Hi-net のウェブサイト (<http://www.hinet.bosai.go.jp/>) にてそれぞれ提供しており、ユーザーが各自の用途に応じた形式の波形データを取得することが可能である。

§ 3. 成 果

3.1 モーメントテンソル解析

震源過程に関する研究は 1990 年代に入り、計算機性能の大幅な向上と通信環境の変化を受けて、より詳細かつ複雑な断層運動の解明が進むとともに、点震源を仮定したメカニズム解の決定については、震源の決定を含めた自動処理が指向されるようになった。CMT 解析の自動処理については、グローバル観測網から得られるデータを用いたものが主流であった [例えば Ekström (1994), Kawakatsu (1995)] が、ローカルな観測網のデータを用いた解析についても、その処理が自動で行われるようになってきた [例えば Pasyanos *et al.* (1996)]。

防災科研においても F-net から得られるデータを利用して、近地表面波を用いた波形インバージョンによるモーメントテンソル解析の定常処理 (以下 F-net MT 解析) が 1997 年より実施されている [福山・他 (1998)]。ここでは、気象庁の震度情報に関する電子メールをトリガーにした自動処理によるモーメントテンソル解析結果を F-net のウェブサイト等で公開すると共に、気象庁におけるルーチン処理による震源 (一元化震源) のうち、気象庁マグニチュード 3.5 以上の地震について解析し、この結果を F-net MT 解として F-net のウェブサイト で公開している。2008 年 3 月現在までに決定した F-net MT 解は約 14000 個である。なお、解析アルゴリズムの

Table 2. List of distributed waveform data format. Open circles (○) denote raw data of continuous waveforms with miniSEED, SEED, SAC and text format. Triangles (△) denote only event triggered waveform data with miniSEED, SEED, SAC and text format. Solid circles (●) denote raw data of continuous waveforms with WIN32 format.

Logger	Seismograph	Sampling Rate (Hz)					
		100	80	20	1	0.1	0.01
Quanterra Q680	STS-1/2	—	○	○	○	○	○
	VSE-311・355G2/3	—	○	△	△	—	—
JGI MS-2000H / KGC HKS-9200-H	STS-1/2	●	—	○	○	—	—
	VSE-311・355G2/3	●	—	○	○	—	—

詳細については福山・他 (1998) ならびに松本・他 (2006) を参照されたい。

観測網の拡充に従って F-net MT 解析が可能な領域も拡大を続け、2000 年以降は南西諸島全域を、2003 年以降は伊豆小笠原弧全域をカバーできるようになった。観測網の整備開始当初である 1998 年では 1 年間に解析された F-net MT 解は 593 イベントであるのに対し、直近の 2007 年では 1393 イベントという非常に多くの F-net MT 解を決定している (Fig. 3)。日本列島周辺域における検知能力としては、Global CMT Project の前身である Harvard 大学 CMT カタログでは $M_w > 5.3$ をカバーしているのに対し、F-net MT 解析カタログでは $M_w > 3.8$ をカバーしていると評価がなされている [Kubo *et al.* (2002)]。

観測点分布が現在とほぼ同様になった 2003 年以降も検知能力は同等であるが、 $M_w 4.0$ 以下の地震では南関東や東北の一部地域においてモーメントテンソル解の決定精度がやや低くなる場合がある。これらの地域は観測点密度がやや粗い地域、つまり観測空白域に相当する場所であり、日本列島全域で均質な観測を行うためにも当初計画通りの観測網の整備が今後も継続して行われることが望まれる。

こうした広域にわたる均質なモーメントテンソル解カタログは広域応力場の推定に欠かせない。Kubo *et al.* (2002) や Otsubo and Kubo (2007) により、南西諸島における応力場解析などが行われている他、CMT データインバージョン法を用いた 3 次元地震発生応力場の推定などが行われており [Terakawa and Matsu'ura (2008) や寺

川・松浦 (2009)]、F-net によるモーメントテンソル解を用いることで応力場の推定可能な領域は従来の陸域における観測網の P 波初動解を使った研究 [Townend and Zonback (2006)] よりも広がられている。

F-net MT 解析では、定常的な処理に加えて陸域の被害地震や巨大海溝型地震の際には詳細な再解析が個別に行われている。陸域で発生した被害地震である 2004 年新潟県中越地震 [松本・他 (2006)]、2005 年福岡県西方沖の地震 [Matsumoto *et al.* (2006)] では本震ならびに余震の詳細なモーメントテンソル解析が行われ、2001 年鳥取県西部地震ではモーメントテンソル解析結果から震源域の応力構造が明らかにされている [Fukuyama *et al.* (2003)]。また、海溝型地震である 2003 年十勝沖地震では、海域における震源深さの決定精度の高さを活かして震源域周辺の詳細なモーメントテンソル解の空間分布を明らかにしている [Ito *et al.* (2004)]。

3.2 震源過程解析

広帯域地震計に記録される遠地地震の実体波からは地震の複雑な震源過程が読みとれる。Kikuchi and Kanamori (1991) は多重震源モデルを用いた遠地実体波解析の手法を開発した。こうした手法により大地震の破壊過程を詳しく調べられるようになり、断層面上に存在するアスペリティの分布 [例えば Yamanaka and Kikuchi (2003)] や応力降下の不均質分布が得られるようになった [例えば Yagi (2004)]。こうした知見は地震規模の把握だけでなく、大地震時の強震動生成域の分布に関する定量的評価を可能とするものであり、強震動予測の高精

Fig. 3. Integrated map of all moment tensor solutions in the NIED F-net MT catalogue in (a) 1998, (b) 2007. The size and gray scale of each beachball correspond to its magnitude and depth, respectively. Moment tensors are projected on the lower hemisphere.

Wen (2006)] など、稠密な観測網が地球ダイナミクスを解き明かす様々な研究分野において空間的に高分解能な解析を可能にしている。

また、Fig. 4 に示すように 2004 年スマトラ島沖地震では、生成された表面波が地球を数周する現象が観測されたが [例えば吉澤 (2006)], こうした表面波を用いた波形インバージョン法による表面波トモグラフィ法は広く行われており [例えば Woodhouse and Dziewonski (1984), Meier *et al.* (1997)], 近年ではさらに有限波長効果を取り入れた手法により、上部マントルの三次元構造の解明がなされている [吉澤 (2005)]. 一方、重力計の観測データから発見された常時地球自由振動 [Nawa *et al.* (1998)] は、後に世界各地の広帯域地震計記録から改めてその存在が確認されており [例えば Nishida and Kobayashi (1999), Kurrle and Widmer-Schmid (2006)], F-net をはじめとする世界の広帯域地震観測網はこうした地球内部構造や地球規模の現象に関する知見の深化を支えている。

§ 4. まとめと今後の展望について

防災科研の F-net は整備開始から約 10 年を経過し、広く一般に向けた良質な観測データの公開に加え、定常的なモーメントテンソル解析などが実施されてきた。公開された波形データや解析結果は、世界的にも稀な非常に高密度に配置された観測網から得られたものであるという特性を活かし、地震活動の把握、広域応力場の解明、震源過程解析、地球深部構造、そして日本列島付近の上部マントル構造と、様々な分野における知見の深化に貢献している。また、浅部超低周波地震、深部超低周波地震といった沈み込み帯で発生する現象の発見に重要な役割を果たすなど、新たな現象の発生メカニズムを解明する上で必要不可欠な研究上の資源を提供している。

これらの成果は、我々が地球を理解するという純粋な自然科学における知の創造としての貢献はもちろん、内陸における被害地震や沈み込み帯における地震発生機構に関する理解を深め、早ければ今世紀半ばまでに起きることが懸念されている東南海・南海地震の発生機構の解明や被害想定等の防災・減災対策へ貢献するものである。また、韓国、台湾や近年整備の進むインドネシア等の広帯域地震観測網との連携を進めることにより、西太平洋地域における地震活動の詳細なモニタリングを可能とし、本地域における一層の地震災害軽減が期待できるであろう。こうした成果を継続して創出するためにも、今後も長期にわたる観測網の安定した維持・運用が必要である。一方、既に製造中止となっている STS-1 型地震計については製品寿命から継続運用が困難になる可能性

もあり、観測品質を維持する上で懸念材料である。したがって、広帯域地震計の更なる高ダイナミックレンジ化・広帯域化といった高度化された測器の開発等も重要な課題である。新たな現象の発見と解明といった未踏領域への挑戦を目指す為にも、観測空白域の解消も含め、関係機関の協力の下で広帯域観測網の更なる性能向上に取り組む必要がある。

謝 辞

本稿で使用した震源要素は、東京大学、京都大学、高知大学、九州大学、産業技術総合研究所、気象庁、防災科研等の地震波形データを気象庁と文部科学省が協力して処理した結果を使用しました。F-net は、防災科研を主体として、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、九州大学、鹿児島大学、地震予知総合研究振興会及び関連する企業のメンバーの助力により運用されています。図の作成には Wessel and Smith (1998) による GMT を使用しました。匿名の二人の査読者、ならびに編集担当者の田中 聡氏には、多くの有益な助言を頂き、本稿の改善に役立ちました。記して感謝の意を表します。

文 献

- Agnew, D. C., J. Berger, W. Farrell, F. Gilbert, G. Masters, and D. Miller, 1986, Project IDA: a decade in review, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **67**, 203-212.
- Clinton, J. F. and T. H. Heaton, 2004, Instrument performance in M8.3 Tokachi-Oki earthquake, *Broadband Seismometer Workshop, Abstracts*, Lake Tahoe, CA.
- Ekström, G., 1994, Rapid earthquake analysis utilizes the internet, *Computers in Physics*, **8**, 632-638.
- 福山英一・石田瑞穂・堀 貞喜・関口渉二・綿田辰吾, 1996, Freesia Project による広帯域地震観測, *防災科学技術研究所報告*, **57**, 23-31.
- 福山英一・石田瑞穂・D. S. Dreger・川井啓廉, 1998, オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, *地震* **2**, **51**, 149-156.
- Fukuyama, E., W. L. Ellsworth, F. Waldhauser, and A. Kubo, 2003, Detailed fault structure of the 2000 Western Tottori, Japan, earthquake sequence, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 1468-1478.
- 針生義勝・小原一成・松林弘智・松本拓己, 2007, 防災科研-台湾中央研究院による広帯域地震波形データ交換システムの構築, *日本地震学会予稿集*, P1-007.
- He, Y., L. Wen, and T. Zheng, 2006, Geographic boundary and shear wave velocity structure of the "Pacific anomaly" near the core-mantle boundary beneath western Pacific, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **244**, 302-314.
- 堀 貞喜, 1990, 防災科学技術研究所における広帯域地震観測, *防災科学技術研究所研究報告*, **46**, 29-44.
- Ishihara, Y., 2003, Major existence of very low frequency

- earthquake in background seismicity along subduction zone of south-western Japan, EOS Trans. Am. Geophys. Union, **84**, Fall Meet. Suppl., Abstract, S41C-0107.
- Ito, Y. and K. Obara, 2006, Dynamic deformation of the accretionary prism excites very low frequency earthquakes, Geophys. Res. Lett., **33**, L02311, doi:10.1029/2005GL025270.
- Ito, Y., H. Matsubayashi, H. Kimura, T. Matsumoto, Y. Asano, and S. Sekiguchi, 2004, Spatial distribution for moment tensor solutions of the 2003 Tokachi-oki earthquake ($M_{JMA} = 7.9$) and aftershocks, Earth Planets Space, **56**, 301-306.
- Ito, Y., S. Sekiguchi, T. Okada, R. Honda, K. Obara, and S. Hori, 2006, Performance of regional distance centroid moment tensor inversion applied to the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake, Japan, Geophys. J. Int., **167**, 1317-1331, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03109.x.
- Ito, Y., K. Obara, K. Shiomi, S. Sekine, and H. Hirose, 2007, Slow earthquakes coincident with episodic tremors and slow slip events, Science, **315**, 503-506.
- 地震調査研究推進本部, 1997, 地震に関する基盤的調査観測計画, < <http://www.jishin.go.jp/main/seisaku/hokoku97/s8kei.htm#1-2> >, (参照 2008-3-27).
- Kawakatsu H., 1995, Automated near-realtime CMT inversion, Geophys. Res. Lett., **22**, 2569-2572.
- Kikuchi, M. and H. Kanamori, 1991, Inversion of complex body waves III, Bull. Seism. Soc. Am., **81**, 2335-2350.
- Krüger, F. and M. Ohrnberger, 2005, Spatio-temporal source characteristics of the 26 December 2004 Sumatra earthquake as imaged by teleseismic broadband arrays, Geophys. Res. Lett., **32**, L24312, doi:10.1029/2005GL023939.
- Kubo, A., E. Fukuyama, H. Kawai, and K. Nonomura, 2002, NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: quality test and application, Tectonophysics, **356**, 23-48.
- Kurrlle, D. and R. Widmer-Schmidrig, 2006, Spatiotemporal features of the Earth's background oscillations observed in central Europe, Geophys. Res. Lett., **33**, L24304, doi:10.1029/2006GL028429.
- 切刀 卓・青井 真・藤原広行, 2009, 強震観測－歴史と展望－, 地震 **2**, **61**, S19-S34 (本特集号).
- Long, M. D. and van der Hilst, 2005, Upper mantle anisotropy beneath Japan from shear wave splitting, Phys. Earth Planet. Inter., **151**, 206-222.
- 松村 稔・伊藤喜宏・木村尚紀・小原一成・関口渉次・堀 真喜・笠原敬司, 2006, 高精度即時震源パラメータ解析システム(AQUA)の開発, 地震 **2**, **59**, 167-184.
- 松本拓己・伊藤喜宏・松林弘智, 2006, 2004年10月23日新潟県中越地震のF-netモーメントテンソル解の空間分布, 地震 **2**, **58**, 427-443.
- Matsumoto, T., Y. Ito, H. Matsubayashi, and S. Sekiguchi, 2006, Spatial distribution of F-net moment tensors for the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake determined by the extended method of the NIED F-net routine, Earth Planets Space, **58**, 63-67.
- Meier, T., S. Lebedev, G. Nolet and F. A. Dahlen, 1997, Diffraction tomography using multimode surface waves, J. Geophys. Res., **102**, 8255-8267.
- Nawa, K., N. Suda, Y. Fukao, T. Sato, Y. Aoyama, and K. Shibuya, 1998, Incessant excitation of the Earth's free oscillations, Earth Planets Space, **50**, 3-8.
- Nishida, K. and N. Kobayashi, 1999, Statistical features of Earth's continuous free oscillations, J. Geophys. Res., **104**, 28741-28750.
- Obara, K., 2002, Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, Science, **296**, 1679-1681.
- Obara, K., K. Kasahara, S. Hori, and Y. Okada, 2005, A densely distributed high-sensitivity seismograph network in Japan: Hi-net by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Rev. Sci. Instrum., **76**, 021301-1-021301-12.
- Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, and A. Yamamoto, 2004, Recent progress of seismic observation networks in Japan – Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net –, Earth Planets Space, **56**, xv-xxviii.
- Otsubo, M. and A. Kubo, 2007, Transitional pattern of stress field between Honshu arc and Ryukyu arc in Japan revealed by the multiple inverse stress analysis using the focal mechanisms, EOS Trans. Am. Geophys. Union, **88**, Fall Meet. Suppl., Abstract, S41C-0107.
- Pasyanos, M. E., D. S. Dreger, and B. Romanowicz, 1996, Toward real-time estimation of regional moment tensors, Bull. Seism. Soc. Am., **86**, 1255-1269.
- Roult, G. and B. Romanowicz, 1984, Very long period data from the GEOSCOPE network: preliminary results on frequencies and damping of free oscillations of the Earth, J. Geophys., **51**, 38-43.
- Sekiguchi, H., S. Aoi, R. Honda, N. Morikawa, T. Kunugi, and H. Fujiwara, 2006, Rupture process of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, Earth Planets Space, **58**, 37-43.
- 汐見勝彦・小原一成・針生義勝・松村 稔, 2009, 防災科研 Hi-net の構築とその成果, 地震 **2**, **61**, S1-S7 (本特集号).
- Suzuki, W., T. Iwata, K. Asano, and N. Yamada, 2005, Estimation of the source model for the foreshock of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes and strong ground motion simulation of the hypothetical Tonankai earthquake using the empirical Green's function method, Earth Planets Space, **57**, 345-350.
- Terakawa, T. and M. Matsu'ura, 2008, CMT data inversion using a Bayesian information criterion to estimate seismogenic stress fields, Geophys. J. Int., **172**, 674-685.
- 寺川寿子・松浦充宏, 2009, 地震学における応力インバージョンの新展開－CMT データインバージョン法による応力場の推定－, 地震 **2**, **61**, S339-S346 (本特集号).
- Tonegawa, T., K. Hirahara, and T. Shibutani, 2005, Detailed structure of the upper mantle discontinuities around the Japan subduction zone imaged by receiver function analyses, Earth Planets Space, **57**, 5-14.
- Townend, J. and M. Zoback, 2006, Stress, strain, and mountain building in central Japan, J. Geophys. Res., **111**, B03411, doi:10.1029/2005JB003759.
- 卜部 卓・東田進也, 1992, win－微小地震観測網波形験

- 測支援のためのワークステーション・プログラム(強化版), 地震学会講演予稿集, 331.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998, New improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Am. Geophys. Union, **79**, 579.
- Wielandt, E. and G. Streckeisen, 1982, The leaf-spring seismometer: Design and performance, Bull. Seism. Soc. Am., **72**, 2349-2367.
- Widmer-Schmidrig, R., D. Kurrle, and E. Wielandt, 2007, Evaluation of installation methods for STS-2 seismometers, EOS Trans. Am. Geophys. Union, **88**, Fall Meet Suppl., Abstract S41A-0241.
- Woodhouse, J. H. and A. M. Dziewonski, 1984, Mapping the upper mantle: Three-dimensional modeling of Earth structure by inversion of seismic waveforms, J. Geophys. Res., **89**, 5953-5986.
- Yagi, Y., 2004, Source rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake determined by joint inversion of teleseismic body wave and strong ground motion data, Earth Planets Space, **56**, 311-316.
- 山田功夫・深尾良夫・石原 靖・青木治三, 1989, STS 地震計による広帯域・広ダイナミックレンジ地震観測, 地震 2, **42**, 21-31.
- Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, 2003, Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body wave, Earth Planets Space, **55**, e21-e24.
- 吉澤和範, 2005, 表面波インバージョンによる上部マントル内部の推定－幾何学的波線から有限幅波線への発展－, 地震 2, **57**, 393-408.
- 吉澤和範, 2006, 2004 年スマトラ島沖大地震で発生した地球周回表面波, 北海道大学地球物理学研究報告, **69**, 15-21.
- Yu, W. and L. Wen, 2006, Inner core attenuation anisotropy, Earth Planet. Sci. Lett., **245**, 581-594.