強震観測

— 歴史と展望 —

独立行政法人防災科学技術研究所*

刃刀 卓・青井 真・藤原 広行

Strong-Motion Observation in Japan — History and Perspective —

Takashi KUNUGI, Shin AOI, and Hiroyuki FUJIWARA

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

(Received March 31, 2008; Accepted December 5, 2008)

The history and developments of strong-motion observation in Japan are reviewed. A special attention is paid to the recent developments of instruments and nationwide observation networks. After the 1995 Hyogoken Nanbu earthquake, thousands of strong-motion seismographs and seismic intensity meters were installed all over Japan. Summary of those networks and the latest strong-motion seismographs are described. The future developments for desirable strong-motion observation are also discussed.

Key words: Strong-motion observation, Strong-motion seismograph, Seismic intensity meter, Earthquake early warning, Real-time strong-motion observation

§ 1. はじめに

日本の強震観測の歴史は、SMAC 型強震計の第 1 号機が東京大学地震研究所に設置された 1953 年 (昭和 28 年) 7 月 29 日より始まるとされる。以後、半世紀以上にわたり、日本の強震観測は発展を続け、貴重な記録の取得を重ねてきた。このあたりの歴史は、2004 年 (平成 16 年) に日本の強震観測 50 年の歩みを記念して開かれたシンポジウム「日本の強震観測 50 年」の講演集に詳しい [強震観測事業推進連絡会議・日本地震工学会 (2004)]。この講演集では、強震観測に携わる 24 以上の機関について、その活動の概要が紹介され、我が国における強震観測の歴史を概観することができる。一方、「地震」第 2 輯における日本の強震観測に関する総合報告としては、「強震動地震学・地震工学研究の現状と展望」の一部としてまとめられた工藤 (1994) のものが最新のようである。この報告では、1994 年 (平成 6 年) から整備が始

まった、気象庁の津波地震早期検知網の設置計画が最新の問題となっており、結果的にはあるが、1995 年 (平成 7 年) に発生した兵庫県南部地震 (阪神・淡路大震災) 以前を俯瞰した形となっている。6,425 名の犠牲者 [宇津 (1999)] を出した兵庫県南部地震の発生は地震に関連する日本の研究開発に対して様々な影響を与えたが、地震被害研究の基礎である強震観測分野に与えた影響はとりわけ大きく、これ以降、日本の強震観測の姿は大きく変化することとなった。兵庫県南部地震の発生以降に新たに整備された強震観測網のいくつかは機器更新の時期を迎え、第二期とも言える時代に入っている。また近年では、震度観測網の整備や、2007 年 (平成 19 年) 10 月から一般に報知されることとなった緊急地震速報の実用化 [東田 (2009)] など、強震観測が学術研究以外の分野に果たす役割が大きなものとなっている。このような背景から、本小論では、網羅的な強震観測網のレビューは既刊の文献に譲り、日本の強震観測の歴史を簡単に振り返るとともに、兵庫県南部地震発生以降にあった重要な進展を紹介して、強震観測の今後を展望する。観測網の紹介では、多くの読者の興味を喚起するため、全国的に配置されデータの入手が比較的容易な強震観測網を優先して取り上げた。強震記録を用いた各種の研究については、本特集号内の各所 [例えば、岩田 (2009)、嶺嶺・三宅 (2009)、翠川 (2009)、佐藤・川瀬 (2009)、座間 (2009)] で詳述されているので、そちらを参照頂きたい。

§ 2. 兵庫県南部地震までの日本の強震観測小史

2.1 強震観測の始まりと SMAC 型強震計

破壊的な強震動を確実に記録するということを強震観測の目的とすれば、世界初の強震観測は米国カリフォルニアにおける USCGS 標準強震計によるものであり、日本においては SMAC 型強震計によるものが初であるといえよう。この両者の開発には、石本巳四雄が考案した加速度計 [Ishimoto (1931)] が深く関わっており、強震観測は地震国である日本が創始したと言ってよいものである。固有周期の短い振子によって振子変位を地動加速度に比例させたことが、石本の加速度計の特徴であり、その基本的な考えは 20 年後の SMAC 型強震計の開発に受け継がれている。もちろん、それ以前にも強震計と名の付く地震計は存在したが、これらの実体は、実動大 (1 倍) に近い倍率をもつ変位計であり、振り切れることを覚悟の上で用いられていた [今村 (1926)]。地震動を振り切れることなく計測することが強震計の使命であろうから、今日の意味での強震計の歴史は、加速度型強震計 (Strong-motion accelerometer) の開発により始まったと言ってよいだろう。

*〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1

日本初の本格的な強震計である SMAC 型強震計の開発は太平洋戦争後に、1948 年（昭和 23 年）福井地震の発生を受けて始まった。福井地震は 3,769 名の犠牲者〔宇津（1999）〕を出すなど大規模な被害地震となったが、被害地域での強震記録は皆無であった。もとより、大地震時の強震動に耐え、これを記録できる強震計が配備されていなかったからである。これを教訓として、強震計開発の必要性が認識され、「標準強震計試作試験研究会（委員会）」が組織されるに至り、SMAC 型強震計の開発が行われることとなった〔高橋（1953）〕。SMAC 型強震計の開発は成功を収め、後に SMAC-A 型とよばれる初期型を基本として、多くの機械式の強震計が開発され、長く日本の強震観測の主力機器の役割を果たした。その一部は今なお現役であり、例えば 1995 年（平成 7 年）兵庫県南部地震においても、NTT 神戸駅前ビルに設置された SMAC-B 型強震計が 800 gal を超える強震動を見事に記録している〔強震観測事業推進連絡会議（1995）〕。強震観測の黎明期に用いられた機器の諸元に関しては、外国のものを含めて金井（1966）にまとめられている。さらに、日本の強震観測を推進するため、1967 年（昭和 42 年）6 月 21 日には、内閣総理大臣に対する日本学術会議の勧告〔日本学術会議（1964）〕や要望〔日本学術会議（1965）〕等に従い、強震観測に関する全国的な連絡調整機関として、強震観測事業推進連絡会議が、当時の科学技術庁国立防災科学技術センター（後の防災科学技術研究所）に設けられている。

2.2 デジタル強震計の開発と強震観測の近代化

日本における強震計のデジタル記録方式への移行は 1980 年代に入ってから本格化した。これは、他の地震に関する観測分野に比べると遅れていると言わざるを得ず、太田・他（1980）が指摘するところともなった。この遅れには、SMAC 型強震計開発の契機となった 1948 年（昭和 23 年）福井地震に匹敵する被害地震が 1995 年（平成 7 年）兵庫県南部地震まで起こらなかったことが関係しているであろうが、1964 年（昭和 39 年）新潟地震や 1968 年（昭和 43 年）十勝沖地震などで SMAC 型強震計が有効に機能したために、むしろ機械式の強震計に信頼が寄せられていたためかもしれない。しかし、後藤・他（1987）や土岐・他（1987）らが明らかにしたように、スタイラス紙への引掻き記録方式に起因する各種の誤差の混入、分解能の不足、記録の絶対時刻が不確かである等、強震波形の利用においては観測性能の不足が問題となった。特に、Aki（1968）による、加速度地震波形を数値積分した変位波形と理論波形の比較が試みられて以来、震源過程研究の分野から強震観測に寄せられる期待は大きなものとなり、加速度記録を安定に変位記録

に変換できることは、強震観測における一つの目標にもなっている。また、構造物の多様化により、設計に考慮すべき周期、振幅の範囲が拡大し、例えば、長周期地震動帯域（周期数秒から 10 秒程度）における性能も重視されるようになった。強震観測事業推進連絡会議は、このような強震観測への要請を考慮して、新しい強震計の標準仕様を検討した〔強震観測事業推進連絡会議（1983）〕。この標準仕様を実現するには、負帰還型加速度計をセンサーとしたデジタル方式の強震計が必要となる。Table 1 には、各時代の強震計の性能比較のため、この標準仕様の一部を示した。気象庁が全国約 80 箇所に整備した 87 型強震計〔若山・他（1989）〕は、機械式の 1 倍強震計を置き換えるべく設計されたものであるが、この標準仕様をほぼ満足する加速度型強震計であった。87 型強震計は、兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台での記録に成功する等、地震学、地震工学の発展に大いに寄与したものである。デジタル化により強震計は精密な電子機器となり、高性能な機器を新規に開発するにはある程度の数量での量産が必要となった。このため、近年の強震観測技術は、大規模な強震観測網の建設に牽引されて発展してゆくこととなる。

2.3 強震計全国配置基本計画

以上、観測機器の面から日本の強震観測の歩みを概観したが、観測点配置の面からはどうであったろうか。強震観測事業推進連絡会議に登録された強震計の数は、1977 年（昭和 52 年）1 月末の集計で既に 1,096 台となっていたが〔強震観測事業推進連絡会議（1977）〕、当時の強震計は、その観測目的や保守のし易さ等から、構造物に設置されることがほとんどであった。結果として、人口の密集した都市域に設置されることが多くなり、観測点は地域的に偏在することとなった。例えば、1984 年（昭和 59 年）長野県西部地震（ $M6.8$ ）では、震央から 50 km 以内でわずかに 1 地点の強震記録しか得られていない〔強震観測事業推進連絡会議（1984）〕。このような状況を改善するために、強震観測事業推進連絡会議は、1972 年（昭和 47 年）に提言された「強震計の全国的配置計画」〔強震観測事業推進連絡会議（1972）〕の再検討を始め、1988 年（昭和 63 年）に「強震計全国配置基本計画」を策定した〔強震観測事業推進連絡会議（1988）〕。この計画では、例えば、 $M6$ の地震で震度 4 相当の強震記録を効率良く採取するためには、どの程度の観測を行うべきであるか等を検討しており、当時最新の地震学・地震工学の知見が盛り込まれたものであった。このように、兵庫県南部地震以前から、破壊的な強震動を逃さず記録するための全国強震観測網の重要性は認識されており、観測点配置計画の具体的な提案もなされていた。特

Fig. 1. Distribution of the stations where JMA87 strong-motion seismographs were installed by JMA (Japan Meteorological Agency).

に、全国を等間隔のメッシュに分割し強震観測点を配置する等の基本概念は、1995年（平成7年）兵庫県南部地震発生後に急ピッチで建設を行うこととなったK-NETの観測点配置計画の下敷きになったものである。なお、「強震計の全国的配置計画」では、強震動の姿を正確に捉えるため、これまで主体であった構造物での観測に換えて、多様な地盤上における強震観測を充実させるべきであると提言しており、この点もK-NETの建設計画に引き継がれた。地盤における強震観測の推進に関しては1977年（昭和53年）にも、科学技術庁資源調査会より、「地震危険度推定に必要な強震観測に関する勧告」[科学技術庁資源調査会（1977）]が出されている。

Fig. 1には、兵庫県南部地震発生以前に実現していた全国的な強震観測網の姿として、気象庁87型強震計の観測点配置が示されている。全国約80箇所の観測点密度では、必ずしも震源近傍での強震動を記録する可能性

が保証されるものではなかった。

§ 3. 兵庫県南部地震以降の強震観測

1995年（平成7年）1月17日に発生した兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）では、震度7に相当する激震に襲われた「震災の帯」と呼ばれる地域が出現した。しかし、当時は強震観測網が十分に整備されておらず、この「震災の帯」の中では強震記録がほとんど得られなかった。また、震度の計測化が正式にはなされておらず、震度情報の迅速な発表に対する体制が十分ではなかったために、政府の初動対応が遅れたことも問題となった。これらの反省から、全国均質な強震観測網や震度観測網の整備が行われ、これ以降、日本の強震観測は大きく変化することとなった。ここでは、新しく整備された代表的な強震観測網の概要を紹介する。

Fig. 2. Station distribution of K-NET operated by NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention).

3.1 K-NET (防災科学技術研究所)

K-NET (Kyoshin Network: 全国強震観測網) は独立行政法人防災科学技術研究所 (防災科研) が運用する, 全国を約 20 km 間隔で均質に覆う 1,000 箇所以上の強震観測点からなる観測網である [Kinoshita (1998), Aoi *et al.* (2004), 藤原・他 (2007)]. K-NET は 1995 年 (平成 7 年) 兵庫県南部地震直後から, 科学技術庁防災科学技術研究所 (当時) により整備が開始され 1996 年 (平成 8 年) 6 月 3 日から運用を開始している. 発足当初の K-NET は, 全国 1,000 観測点からなる観測網であったが, 現在では関東東海地域の一部の観測点や相模湾の海底ケーブル式地震計 [Eguchi *et al.* (1998)] の海底観測点も加わり, その観測点数は, 2008 年 (平成 20 年) 4 月 1 日の時点で 1,028 に達している. Fig. 2 には K-NET の観測点分布図 (2008 年 4 月 1 日現在) を示した. 強震計は海底ケーブル式地震計を除けば, すべて地表に設置されており, 市

町村役場や学校などの公共施設の敷地内にあることが多い. このため, K-NET は地震被害と強震動に関連する研究に特に適した観測網である.

K-NET の整備は, 日本の強震観測史上で, もっともインパクトのあった事象の一つであろう. 全国均質な観測点配置, 全観測点同一仕様の強震計, インターネットによる速やかなデータ公開等はその後の強震観測のあり方に大きな影響を与えた. 当初, この観測網に導入された強震計は, K-NET95 型強震計と呼ばれるものであり, その記録特性に関しては, 木下・他 (1997) により詳しい報告がなされている. Table 1 にはその一部を示した. K-NET は, 1,000 箇所の観測点が一斉に運用開始となったことや均質な観測点配置と相まって, 運用開始から 2008 年 3 月末までに, 10 万波形以上の強震記録を蓄積することとなった. 時間・空間的に均質な K-NET のデータセットは統計的な処理にも耐えるもので, 例え

Fig. 3. Station distribution of KiK-net operated by NIED. Large circles denote the stations that have a borehole of 2,000 m or deeper. Small circles denote the other stations.

Table 1. Performance of SMEOC83, K-NET95 and K-NET02. SMEOC83 is the model of a strong-motion seismograph proposed by SMEOC (Strong Motion Earthquake Observation Council) in 1983.

	SMEOC83	K-NET95	K-NET02
Full Scale	2000 gal	2000 gal	4000 gal
Sampling Rate	100 Hz	100 Hz	100 Hz
Band Width	0.05~25 Hz	DC~30 Hz	DC~30 Hz
Nominal Resolution	16 bit	24 bit	24 bit
Effective Resolution	14 bit	19 bit	22 bit
Dynamic Range	86 dB	114 dB	132 dB
Developed/Proposed	1983	1995	2003

ば, Fujiwara *et al.* (2008) は, 全国の K-NET の観測点において, 確率論的な地震動予測地図から期待される震度の観測回数と, 実際の震度の観測回数との比較を行っている. K-NET の観測点建設にあたっては, 観測点近傍で

最深 20 m までの土質ボーリングと PS 検層・密度検層が行われ, 土質柱状図と検層データも公開されている. このような検層データ (メタデータ) が強震記録とともに公開されていることについては, 特に海外の研究者からの評価が高い. K-NET95 型強震計は, 導入当初は最新の強震計であったが, 年数が経過するに従い, 通信方式をはじめとする技術発展が速い分野で最新技術からの遅れが見られるようになった. また, データ回収・公開の高速化や計測震度の算出など, 開発当初には想定されていなかった機能が求められるようになった. これらに対応するため, 防災科研は 2002 年 (平成 14 年) 度から K-NET95 型強震計の後継機の検討を行い, 2004 年 (平成 16 年) 度には, 東南海・南海・東海地震による強震動の発生が懸念される地域と宮城県・岩手県の一部にある 443 観測点に K-NET02 型とよばれる新規に開発された強震計を設置した. さらに, 2006 年 (平成 18 年) 度には,

Fig. 4. Distribution of the seismic intensity observatories operated by JMA.

東日本地域にある467観測点に、2007年(平成19年)度には最後に残った118観測点に、K-NET02型強震計の改良型であるK-NET02A型強震計を設置した。K-NET02型・02A型強震計はその高い分解能や演算機能から、現時点で世界最高水準の強震計である。Table 1にはその仕様のうち計測性能に関わる部分を示した。K-NETのデータ公開はインターネットを通じて行われている。特に、2005年(平成17年)からは、K-NET02型・02A型強震計の準リアルタイム波形伝送機能を用いて、強震記録を受信後直ちに公開する、即時データ公開システムの運用を開始している。なお、K-NET02型・02A型強震計については、最新の強震計の例として次章で改めて紹介する。

3.2 KiK-net(防災科学技術研究所)

全国にわたる総合的な地震防災対策を推進するため、地震防災対策特別措置法が制定され(1995年7月18日

施行)、同法に基づく地震調査研究推進本部令により、1995年(平成7年)7月18日に地震調査研究推進本部が総理府に設置された(現在は文部科学省に設置)。地震調査研究推進本部の下では、地震に関する各種の基盤的調査観測が推進されることとなったが[地震調査研究推進本部(1997)], KiK-net(Kiban-Kyoshin Network: 基盤強震観測網)は、この一環として、Hi-net[小原(2001), 汐見・他(2009)]に併設される形で防災科研により建設された強震観測網である[Aoi *et al.* (2004), Okada *et al.* (2004)]. KiK-netの観測施設は、2008年(平成20年)4月1日の時点で全国694箇所に配置され、各観測施設では地表と地中の2箇所に強震計が設置されている。地中強震計はHi-netの高感度地震計と共に耐圧容器に入れられ、深さ100m以上の観測井の孔底に設置されている。KiK-netの観測点分布図(2008年4月1日現在)をFig. 3に示した。図中の大きな丸は深さが2,000m以上に及ぶ

Fig. 5. Distribution of the seismic intensity observatories operated by prefectural governments.

観測施設を表しており、大阪市此花区に設置されている1地点を除いて、11地点が関東地方に分布している。最深の観測井は、さいたま市岩槻区にある岩槻深層観測施設であり、深さ3,510 m [鈴木・他 (1981)] である。

KiK-net では、Hi-net 観測施設の地点選定の関係から、K-NET に比べると全般的に硬質な地盤上に観測施設が設置されているのが特徴である。同様な理由から、都市部にある観測施設の数は少ない。建設当初は、SMAC-MDK 型という K-NET95 型と同等の性能を持つ強震計が使用されていたが、K-NET と同様の理由から、2007 年 (平成 19 年) 度中に、K-NET02A 型とほぼ同じ計測性能を持つ KiK-net06 型強震計に置き換えられている。KiK-net06 型強震計は、P 波初動による地震諸元推定のための B- Δ 演算 [Odaka *et al.* (2003), 東田・他 (2004)] やリアルタイム震度演算 [刃刀・他 (2008)] の機能を持ち、地震検知時や強震動が一定レベル以上に達した場合に、

Hi-net の連続回線を通じてデータセンターに即時通報を行う機能を持つ。地中強震計のデータを利用することにより、B- Δ 演算による地震諸元推定の精度が向上するという結果も報告されており [中村・他 (2006)]、今後は地中強震計の特徴を活かした応用も期待される。また、2008 年 (平成 20 年) からは、Hi-net データを着末着法 [Horiuchi *et al.* (2005)] で処理して震源情報を即時推定し、地震波が到達する前に、Hi-net の連続回線を通じて、強震計を一斉に遠隔でトリガーし、観測点から ISDN 回線のダイヤルアップを開始させる新しいトリガー方式 (センタートリガー方式と呼ぶ) の試験も始めている。KiK-net のデータもインターネットを通じて公開されている。

3.3 気象庁の強震観測網

気象庁は、1996 年 (平成 8 年) 10 月から 95 型震度計の正式運用を開始している。本来、震度計は計測震度を

Fig. 6. Distribution of the seismic intensity observatories operated by JMA, prefectural governments and NIED K-NET.

算出することを目的とした機器であるが、基本的な構成は強震計と変わらない〔気象庁（1996）〕。95型震度計は、波形収録機能や電話回線等を通じた波形転送機能を備えており、一定の震度（時期により基準は異なる）を記録した強震波形は気象庁に集約されている。また、気象庁が運用する地震計として特筆すべきものに、2004年（平成16年）7月から観測を開始した多機能型地震観測装置がある。これは、「ナウキャスト地震計」という別名でも知られているもので、2007年（平成19年）10月から一般にも報知されることとなった緊急地震速報システムの中核をなす機器である〔原田（2007）〕。多機能型地震観測装置の基本部分は負帰還型加速度計をセンサーとする強震計であり、さらに震度計としての機能やB-Δ演算による単独観測点データを用いた地震諸元推定機能を持っている。多機能型地震観測装置は加速度計の出力を100 Hz サンプリングで気象庁本庁にテレメータしてお

り、今後はリアルタイム強震観測網としての活用を期待したい。現在のところ、気象庁から強震記録の公開は、95型地震計と多機能型地震観測装置を一括してなされている。これらの記録は定期的にCD-ROM等で刊行されているほか、大きな地震の場合はインターネットを通じて速報的に公開されることもある。95型震度計と多機能型地震観測装置は、全国約600地点に展開されている。95型震度計（一部は多機能型地震観測装置）の観測点分布図をFig. 4に示す。震度観測点の配置には人口分布も考慮されているため、空間的に均質な分布とはなっていない。なお、87型強震計は1997年（平成9年）3月末で、運用を終了しているが、観測データはCD-ROM等で刊行されており入手可能である。気象庁では、気象庁独自の震度観測点（619地点）の他、次節で述べる震度情報ネットワークの観測点の大部分（2,839地点）、既に述べた防災科研K-NETの一部（781地点）、の計約4,239地

点(2008年4月1日現在)の震度データを統合している。Fig. 5に震度情報ネットワーク観測点のうち、地方自治体が設置し気象庁の震度情報に統合されている震度観測点の分布図を、またFig. 6に気象庁が統合している全ての震度観測点の分布図を示す。これらの震度データは、国や地方自治体の防災行政に活かされるとともにテレビ等を通じて一般に公表され、国民にとって最も身近な地震に関する情報となっている。

3.4 震度情報ネットワークと地方自治体の震度観測

震度情報ネットワークは、自治省消防庁(現在は総務省消防庁)の補助の下、1995年(平成7年)度から1996年度にかけて各都道府県により整備された[消防庁(2006a)]。整備の目的は、市町村を単位として震度を計測し、かつ、ネットワークを介して震度情報を都道府県、総務省消防庁まで伝達できるシステムを構築するものである。この結果として、基本的に各市町村に最低1地点の震度観測点が整備されることとなった。これらの観測点のほとんどは、市町村役場の敷地内に設置され、役場庁舎内の表示器での震度情報の確認を可能にしていることが特徴である。震度情報ネットワークの観測点は3,318地点(2004年9月9日現在)に上る。このうち、いくつかの点では気象庁の震度観測点、もしくはK-NETと施設を共用しており、震度情報ネットワーク独自の観測点は2,823地点(2004年9月9日現在、観測点分布については前節で触れた)である。全国を合計すれば、日本最大の地震観測網といえるものであるが、観測点整備の主体は都道府県であり、各都道府県単位で個別に運用が行われている。データ公開への対応は各都道府県により異なるが、顕著な地震の際には、気象庁からの依頼により強震記録の回収がなされ、気象庁の震度計の強震記録とあわせて公開される場合もある。また、震度計や強震計の設置を都道府県ではなく、市町村が独自に行っている場合もある。特に横浜市は約150箇所の観測点からなる、世界でも類を見ない高密度強震計ネットワークシステムを構築している[菊地(1996)]。さらに、これらの地方自治体の震度観測網の波形データを、地域の中核大学が中心となっておりとりまとめる、首都圏強震総合ネットワークSK-net(首都圏、長野県、静岡県)や東海地域大都市圏強震観測総合ネットワークTAS-net(中京地域)などの試みも行われている[飛田・他(2001)、東京大学地震研究所Seismic Kanto研究グループ(2002)]。最近では、K-NET・KiK-netの強震記録と震度計の強震記録等を組み合わせることで大きなデータセットを構成し、各種の研究が行われることも多い。

3.5 その他の特徴ある強震観測

ここでは、新しく整備された全国観測網という範疇に

は入らないが、特徴ある強震観測のいくつかについて触れる。

3.5.1 速度型強震計による強震観測

日本で独自に発達した地震計として速度型強震計がある[村松(1995)、木下(1998)]。加速度計に比べ扱いが難しく、価格が割高であることから、大規模な観測網で用いられることは少ないが、防災科研が運用する広帯域地震観測網であるF-net[松本・他(2009)]では、STS-2に代表される広帯域地震計の振り切れ時の代替として用いられている。海外ではこの役目はHutton *et al.* (2006)のように加速度計が担っているが、速度型強震計の方が分解能に優る。特に、関西地震観測研究協議会(関震協)では、1995年(平成7年)兵庫県南部地震以前から、速度型強震計を主力とした観測を始めており、兵庫県南部地震時に断層近傍での貴重な記録を得ている[Toki *et al.* (1995)]。また、北海道開発局(当時)も146地点からなる速度型強震計の観測網を建設している[佐藤・他(2001)]。近年は、石油コンビナート地域等に展開された、総務省消防庁[消防庁(2006b)]や東京電力[土方・他(2006)]の観測網のように、長周期地震動観測のために採用される例も多い。速度型強震計は海外でも着目されているものであるが[Clinton and Heaton(2002)]、現在のところ開発された例はない。

3.5.2 港湾地域強震観測等の強震観測

港湾地域強震観測[野津・他(2004)]は1962年(昭和37年)に開始され、八戸波として知られる1968年(昭和43年)十勝沖地震時の八戸港の記録を初め、貴重な強震記録を多く取得している。特に、データ公開に関して積極的であり、現在は、独立行政法人港湾空港技術研究所がとりまとめて、国土交通省国土技術政策総合研究所(国総研)が窓口となり、インターネット経由でデータを公開している。また、国総研も全国の河川施設・道路施設で強震観測を行っており、最大加速度やSI値の情報がインターネット経由で公開されている[日下部・他(2003)]。

3.5.3 半導体加速度センサーを用いた小型強震計

最新技術を取り入れて近年実用化したものに、MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)加速度計とも呼ばれる、半導体加速度センサーを用いた小型強震計がある。携帯端末などの姿勢検知に用いる半導体加速度センサーを用いて強震計を構成したもので、従来の強震計より小型かつ安価に製造できるのが特徴である[例えば、Holland(2003)、福和・他(2003)、鷹野・他(2004)、堀内・他(2007)]。ただし、半導体加速度計センサーの自己ノイズは、機種によっては数galに及ぶものもあり、明らかな有感地震の記録が機器ノイズに埋もれてしまうこ

ともある。東京ガスの新 SI センサー網 (SUPREME) は、半導体加速度センサーを採用したライフラインの安全管理のための観測網として知られており、2001 年 (平成 13 年) 7 月から稼働している [清水・他 (2001)]。この観測網は供給区域約 3,100 平方 km に対し約 3,800 基の配置であり、世界一高密度な地震防災システムとされている。小型強震計は 1 台あたりのコストを抑え、高密度観測網を展開できるところに最大の利点がある。高い観測精度を要求されない用途であれば、今後広がりを見せるであろう。

3.5.4 機械式強震計記録の数値化データ

最新の強震観測という話題からは外れるが、最近、1923 年 (大正 12 年) 関東地震の今村式強震計記録が鹿島建設株式会社から、また、長年にわたり運用された気象庁 1 倍強震計の記録が総務省消防研究センターから、それぞれ数値化データとしてインターネット上で公開され、震源過程の解明や長周期地震動に関する研究に役立つものとして期待されている。近年発達したスキャナー装置や数値化技術により可能になった部分もあるが、なによりも、観測を実施し記録の整理保管にあたった先人の努力に拠るものである。強震動を確実に記録し後世に伝えるという観測の基本が、いかに重要なものであるかを示す例といえよう。

§ 4. 最新の強震計

ここでは、最新の強震計の例として、筆者が開発を担当し、2005 年より展開が始まった K-NET02 型および K-NET02A 型強震計を紹介する。

4.1 K-NET02 型・02A 型強震計の概要

K-NET02 型強震計の開発にあたっては、1) 震度観測を可能にし、気象庁が行う検定に適合した正式な震度計としての機能を有すること、2) 観測点からの自動データ送信を行うこと、3) 強震計としての基本性能を向上すること、の 3 つを実現することに目的が置かれた。こ

のため、K-NET02 型強震計は、震度演算機能の搭載、トリガー式準リアルタイム波形伝送の実現、高性能 AD 変換器の採用、などの特徴を持つこととなった。なお、K-NET02 型強震計と K-NET02A 型強震計では、採用している加速度計が異なるが、計測性能としては同等である。

K-NET で採用された新旧の強震計について Table 2 に比較を示す。実効分解能は、K-NET95 型が 19 bit、K-NET02 型が 22 bit で、計測可能な最大加速度は、K-NET95 型は 2000 gal、K-NET02 型が 4000 gal となっている。サンプリング周波数は、双方とも 100 Hz であり、周波数特性は DC から 30 Hz まで平坦である。K-NET02 型強震計の特徴の一つとして、連続記録の収録を可能にしたことがあげられる。従来の強震計では、地震トリガー時のほかは定期点検などの限られた時間区間でしか記録動作を行わないため、軽微な故障や波形品質の低下が見逃される傾向にあり、結果として地震時の記録成功率 (稼働率) が下がる原因となっていた。K-NET02 型強震計では、機器の状態や記録品質を常時自動的にチェックすることで、地震トリガー時の動作不良や波形品質の低下を防ぐように設計されており、実際にはほぼ 99.5% の稼働率で運用されている。このように、K-NET02 型強震計は従来のトリガー収録を主体とした強震計とは異なる思想のもと開発された強震計であり、常時接続回線が利用可能であればリアルタイムでの連続波形伝送も可能である。K-NET95 型強震計の GPS (Global Positioning System) 信号による時刻同期は、1 時間に 1 回の間欠式であったが、K-NET02 型強震計では、連続記録を取り扱うため常時同期方式が採用されている。さらに、GPS 信号が使用できない場合は、NTP (Network Time Protocol) を用いて通信回線経由で時刻同期する機能も持つ。K-NET02 型強震計は、オペレーティングシステム (OS) として Linux を搭載しており、システムプログラムの更新や機能拡張を容易かつ確実に行えるようになってい

Table 2. Comparison of K-NET95, K-NET02 and K-NET02A.

	K-NET95	K-NET02	K-NET02A
Full Scale	2000 gal	4000 gal	4000 gal
Dynamic range (RMS/F.S.)	114 dB (19 bit)	132 dB (22 bit)	132 dB (22 bit)
Scale factor	0.24 mgal/count	0.63 mgal/count	0.63 mgal/count
Power consumption	16 W	35 W (5 W in low power mode)	35 W (5 W in low power mode)
Accelerometer	V403-BT (Akashi)	FBA-ES (Kinematics)	JA-40GA(JAE)
JMA seismic intensity	×	○	○
Data communication	RS-232C	10BaseT (TCP/IP)	10BaseT (TCP/IP)
Recording capacity	8 MB	512 MB	768 MB
Programmable by user	×	○ (Linux OS)	○ (Linux OS)
Recording continuous data	×	○	○

る。また、停電時には一定時間が過ぎると、通信機能や演算機能を停止して計測のみを行う低消費電力モードに移行し、蓄電池による長期観測を可能にする。これは、本震による被害で電力供給が絶たれた場合においても、大きな余震を確実に記録するために必要な機能である。

4.2 トリガー式準リアルタイム波形伝送

トリガー式準リアルタイム波形伝送とは、地震を検知すると強震計が自動的にデータセンターとの通信を開始し、地震波形データおよび震度データを送信する方式であり、データ通信の即時化のために新しく採用された。通信回線としては通常の ISDN 回線を用いているため、ダイヤルアップが確立するまでの時間がかかるが、概ねトリガー後 8 秒以内にはリアルタイム伝送状態に移行する。K-NET02 型・02A 型強震計からの接続を受け付けるためデータセンター側では、500 回線以上の ISDN 回線を持っており、全観測点（約 1,000 箇所）のうち半数が一度にトリガーしても対応可能な態勢を取っている。K-NET95 型強震計のデータ回収では、地震終了後にデータセンター側からダイヤルアップを行っていた。このため、大きな地震時には、公衆回線の輻輳の影響により地震直後に最も必要とされる震源域の強震記録の回収に半日以上を要することもあった。これに対し K-NET02 型・02A 型強震計によるトリガー式準リアルタイム波形伝送では、地震発生後数秒のうちに記録の伝送を自動開始するため、輻輳の影響を受けるおそれが少ない。例えば、K-NET02 型強震計の展開以前に発生した 2000 年（平成 12 年）鳥取県西部地震では、輻輳とその後の通信規制の影響を受け、地震発生から 10 時間以上にわたり震源域の強震記録の回収が完了しなかったが、全点で K-NET02 型・02A 型強震計の展開が完了していた 2007 年（平成 19 年）新潟県中越沖地震では、地震発生後 10 分以内にインターネットによるデータ公開を完了している。

4.3 K-NET02 型・02A 強震計の計測特性

最新の強震計を用いて、500 gal 程度以上のフルスケールで観測を行う場合、後述する加速度計の不安定性を除けば、記録の分解能を決めるのは AD 変換の性能である。K-NET02 型強震計はダイナミックレンジ 132 dB 以上という、広帯域地震観測用の記録計に匹敵する AD 変換性能をもっている。K-NET95 型強震計から K-NET02 型強震計への AD 変換性能の向上は飛躍的なもので、最大計測レンジが 2000 gal から 4000 gal に引き上げられたにも関わらず、記録分解能が約 10 倍改善されている。Fig. 7 は、ごく静かな強震観測施設である筑波強震観測施設（茨城県つくば市）において K-NET95 型・02 型強震計により観測された 5 分間の微動記録である。この観測点では微動レベルが低いため、微動記録はほぼそのま

ま強震計の自己ノイズを表すこととなる。K-NET95 型強震計による微動記録は両振幅で 50 mgal 程度であるが、K-NET02 型強震計のそれは 5 mgal 程度となっており、実際の記録からも K-NET02 型強震計における記録分解能改善の効果が見て取れる。記録の分解能が高ければ、数値積分により加速度記録から速度記録へ変換する際のノイズが低減する。この性能は、特に長周期地震動の観測に際し威力を発揮する。切刀・他（2005）は、K-NET02 型強震計で収録された加速度記録から変換した速度記録と、VSE355G2 速度型強震計の記録を比較して、K-NET02 型強震計の自己雑音レベルは、1 ～ 20 秒の帯域で、両振幅 1.2×10^{-5} m/s (1.2 mkine) 程度であるとしている。これは、観測の目的によっては、速度型強震計を代替する性能である。

2006 年（平成 18 年）度から行われた K-NET02A 型強震計の開発に際しては、加速度計の安定性を向上するべく試験観測と機種選定を行い、K-NET02 型強震計で用いられたキネメトリクス社のエビセンサー（FBA-ES）に換えて、高精度振動計測用に新しく設計された加速度計である日本航空電子工業製の JA-40GA 型加速度計〔日本航空電子工業株式会社（2007）〕を採用した。JA-40GA 型は従来品の JA-5V 型と同様に可動部にクォーツフレクチャ（石英ヒンジ）を採用した加速度計である。この種の加速度計は、従来よく用いられていた金属製の可動部を採用した加速度計に比べ、加速度強震記録にしばしば見られる " とび " といわれるステップ状ノイズ（広帯域地震計ではグリッチ、重力計ではテアとも呼ばれる現象）の発生が少ないという利点を持つ。強震動時の挙動に関しては、今後の観測によるデータの蓄積を待つ必要があるが、静穏な環境下の連続観測では、偶発的なステップ状ノイズの発生がほとんどないことが確認されて

Fig. 7. Records of instrumental noise obtained by K-NET95 and K-NET02 at the Tsukubane strong-motion observatory. Both traces are vertical component.

いる。また、JA-40GA 型加速度計は、温度変化に対するドリフト安定性にも優れている。

以上のように、最近の 10 年間で強震計の観測性能は飛躍的に向上した。しかし、極めて希にしか発生しない強震動を待ち受ける強震計には、計測性能とともに稼働率の高さがなによりも求められる。今後は、さらに高い計測性能をもつ強震計の開発も重要ではあるが、地震早期警報の用途等には、計測の確実性に重点をおいた強震計の開発も必要となってくるだろう。

§ 5. 強震観測の将来展望

岩田 (1991) や工藤 (1994) は、観測点配置の問題により、日本では強震動地震学の発展に不可欠である震源近傍の強震記録が米国にくらべ圧倒的に不足していることを指摘していた。しかし、全国を覆う均質な強震観測網である K-NET や KiK-net、強震記録の収録を可能にした震度計の展開によってこの状況は大幅に改善されることとなった。現在、日本の強震観測体制は世界の最先端にあるといってもよく、記録公開の即時性や記録品質の高さ等もあって、国内のみならず海外からも盛んに利用がなされている。Table 3 は、K-NET・KiK-net によって観測された顕著な強震記録の表である。K-NET・KiK-net では、建設当初の目的どおり、内陸活断層型地震である 2000 年 (平成 12 年) 鳥取県西部地震、2004 年 (平成 16 年) 新潟県中越地震、2008 年 (平成 20 年) 岩手・宮城内陸地震や、海溝型巨大地震である 2003 年 (平成 15 年) 十勝沖地震の記録を初めとする、様々なタイプの強震記録の取得に成功している。これらの強震記録がいかに貴重なものであるかは、近年の強震動地震学や地震工学の進展を見れば明らかであろう。特に、2008 年岩手・宮城内陸地震時に震源域直上で得られた KiK-net 一関西観測

点の強震記録 (上下動最大加速度 3866 gal, 三成分合成最大加速度 4022 gal) [Aoi *et al.* (2008), 地震調査研究推進本部 (2008)] は、新型の KiK-net06 型強震計の配備により最大計測レンジが 2000 gal から 4000 gal に引き上げられたわずか数ヶ月後に得られたものである。確実かつ正確な強震観測は、将来起こりうる大震災の被害軽減の基礎となるものであり、今後も気を緩めるわけにはゆかない。格段に充実したここ 10 年余りの観測成果は、特に、空間的に均質な強震観測を高い稼働率で長期継続していくことの重要性を示している。

工藤 (1994) や強震観測事業推進連絡会議・日本地震工学会 (2004) は、強震記録利用の推進のために、データ流通と一元的なデータ公開の仕組みを整備すべきであると提言している。皮肉なことであるが、近年の強震観測は大規模な観測網が主導しているため、利用可能な強震記録が増えている割には、観測網を統合したデータ公開は進んでいない。ただし、近年の強震観測網の記録は機器特性等が均一であることが使いやすさの一部に寄与しており、必ずしも異なる観測網の記録を統合することが利用者の益になるとは限らない。しかし、米国の COSMOS VDC (Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation System Virtual Data Center) [Archuleta *et al.* (2006)] が実施しているクリアリングハウスのような考えで利用者の便を図ることも一案であり、将来は、一元的なデータアクセスの仕組みが整えられることが期待される。特に、強震記録のプレビューの意味もある震度や最大加速度等の強震動指標は迅速にとりまとめられてしかるべきであろう。強震観測の目的は実施機関によって多様であり、必ずしもデータ公開を前提とした運用体制がとられていない場合も多く、さらには、強震記録を残すことが本務ではない危機管理を目的とした観測網

Table 3. Remarkable records obtained by K-NET and KiK-net.

Site Code	Site Name	Network	ED*	Acceleration (gal)				Earthquake
				NS	EW	UD	Vector	
TTRH02	Hino	KiK-net	7 km	927	753	776	1142	2000 Tottoriken Seibu
IWTH04	Sumita	KiK-net	48 km	730	723	1280	1305	2003 Miyagi-oki
IWTH27	Rikuzentakata	KiK-net	28 km	888	556	637	1098	
HKD100	Hiroo	K-NET	84 km	810	973	461	988	2003 Tokachi-oki
NIG019	Ojiya	K-NET	7 km	1147	1308	820	1502	2004 Niigataken Chuetsu
NIG021	Tohkamachi	K-NET	21 km	1716	850	564	1750	
ISK005	Anamizu	K-NET	19 km	473	782	556	903	2007 Noto Hanto
ISK006	Togi	K-NET	7 km	717	849	462	945	
NIG018	Kashiwazaki	K-NET	21 km	667	514	369	813	2007 Niigataken Chuetsu-oki
AKTH04	Higashinaruse	KiK-net	22 km	1318	2449	1094	2600	2008 Iwate-Miyagi Nairiku
IWTH25	Ichinoseki Nishi	KiK-net	3 km	1143	1433	3866	4022	

* ED: Epicentral distance

もある。もちろん、技術の発展によってデータ公開に関わる実質的な手間とコストは軽減していくと予想されるが、今後は、データ流通の促進のために、データ提供元に対して、統合処理結果等の実質的な還元がある仕組みを作り出す必要がある。このような中であって、2007年(平成19年)新潟県中越沖地震時に震源近傍にあった柏崎刈羽原子力発電所の強震記録[東京電力株式会社(2008)]が公開された[東京電力株式会社(2007)]ことは歓迎すべきことであり、後に続く流れを期待したい。

気象庁や地方自治体による震度観測点や多機能型地震観測装置の観測網は、国民の安心・安全を直接左右するものとして極めて重要であるが、本来は強震観測を目的としたものではない。これまで、これらの危機管理を本務とする観測網から付随的に得られた強震記録が学術研究目的のために提供される、という流れがもっぱらであった。今後は、観測点整備に際しては可能な限り強震計のリアルタイム伝送化等を進め、強震観測を主目的とした各種の観測網が、危機管理を目的としたシステムに観測情報を提供するという逆方向の流れも考慮すべきであろう。地震早期警報や強震動分布推定の精度は、観測点密度に拠るところが多分にある。気象庁が統合している震度観測点の分布(Fig. 6)と、個々の機関の観測点分布(Figs. 2, 4, 5)を比較すれば、複数の観測網が相補うことの重要性は明らかであろう。新型 K-NET 強震計が震度計としての機能を搭載し、震度情報を気象庁に提供することになったのは社会の要請ともいえ、今後はこのような連携を更に推進する必要がある。例えば、K-NET の観測施設に工学的基盤深度の地中強震計を併設し、全点リアルタイム伝送化すれば、緊急地震速報の精度は飛躍的に高まるであろう。なお、強震動予測は工学的基盤での値をコントロールポイントになされることが多いため、工学的基盤深度での全国的な観測も重要であることもここで強調しておきたい。また、日本のように強震観測網が密であれば、観測データから割り出した震源諸元と距離減衰式を組み合わせるよりは、観測された強震動データを直接空間補間する方が、遙かに現実に近い強震動分布の推定が行える。この考えに基づき、気象庁は推計震度分布図[気象庁(2008)]の提供を行っているが、現在のところ、震度情報を入手するまでに一定の時間を要する。いまのところ、強震動分布の把握よりは震源情報の解析のために設置されている F-net や多機能型地震観測装置以外には、全国規模でリアルタイム伝送された強震観測網はない。空間密度の高い強震記録がリアルタイムで利用可能ならば、ある時点までに観測された強震動データで数秒先の面的な強震動分布を予測する、「強震動で強震動を予測する」試みが可能になるかもしれない。

い。緊急地震速報的なアプローチ(予測情報)と強震動分布推定(事後情報)の二つの手法をシームレスに扱えるところが、振り切らない地震計である強震計のデータをリアルタイム伝送することの強みであろう。この観点に基づく提言は、防災科学技術研究所(2007)等でなされ始めており、緊急地震速報の次のステージを考える上で、今後重要な位置を占めるものと思われる。

本小論では、主として全国規模の強震観測について述べてきた。地域・地点に限った強震観測の展望に関しては、ここで記述し尽くせるものではないが、特に整備が難しいものとして、海底と深層での強震観測を挙げよう。海底での強震観測は圧倒的に不足しており、今後の充実が望まれるものである。現在、強震計が設置されている海底ケーブル式地震観測施設は、伊東沖、三陸沖(東京大学地震研究所)、相模湾(防災科研)、室戸沖、釧路沖(独立行政法人海洋研究開発機構、以下海洋機構)の5つであるが、気象庁により東海沖から熊野灘[齋藤(2007)]に、文部科学省(海洋機構が実施)により紀伊半島沖[金田・他(2007)]に敷設計画が進行中である。ともに発生が懸念される海溝型大地震の想定震源域に敷設されるもので、緊急地震速報の高度化に役立つとともに、貴重なデータが取得されることが期待されている。海底での強震観測では、地震計筐体と海底堆積物間のカップリングの問題があり、強震動をどこまで忠実に記録できるかは未知の部分がある[Duennebie and Sutton(1995), 林(1998)]。K-NET 観測点の一部である防災科研の相模湾海底ケーブルシステムの海底観測点では、カップリング向上のための治具を設置しているが、効果が検証されているわけではない。海底ケーブルによる観測は総合的なものになり、必ずしも強震観測の都合が優先されるわけではないが、今後は振動台実験等により海底での観測機器の振動特性を明らかにしてゆく必要もあろう。

深層観測施設の建設は困難なものであるため、その数は少ない。首都圏には、防災科研が建設した、岩槻(深度 3,510 m)、下総(深度 2,300 m)、府中(深度 2,753 m)、江東(深度 3,000 m)の4つの 3000 m 級の深層観測施設[Takahashi and Hamada(1975), 鈴木・他(1981)]に強震計が設置されているが、1995年(平成7年)1月に観測を開始した江東深層観測施設を最後に 3000 m 級の観測施設の新設はなされていない。先第三紀の基盤内に設置されたこれらの強震計は、首都圏の強震動予測に重要なデータを提供するものである。また、S波が地表まで伝搬するのに数秒を要する地中において強震動を観測することができれば、地震早期警報への新たな利用も考えられる。3000 m 級の観測井では、孔底での温度が

80℃以上に達する等、通常の観測井に比べ環境は過酷であり、長期安定した観測を行えるか等克服すべき課題もあるが、都市域における地震早期警報への応用もあるため、今後の増強が望まれる。

§ 6. ま と め

本小論では最新の事例を交え、日本の強震観測の歴史を振り返るとともに将来を展望した。日本の強震観測は、1948年(昭和23年)福井地震を契機としてSMAC型強震計が開発され、1995年(平成7年)兵庫県南部地震を教訓としてK-NETに代表される全国的な強震観測網が整備されるなど、後手にまわってきたことは否めない。しかし、近年、緊急地震速報に代表される地震早期警報の技術が発展し、また、K-NETが準リアルタイムで波形収集を始める等、リアルタイム地震防災の分野では、研究開発とシステムの実用化が急速に進展している。これらの状況により、ようやく、強震観測が地震被害の軽減に直接役立つ素地ができてきたといえよう。地震国である日本においては、大規模な強震観測網は学術研究目的のためだけに存在している訳ではない。こしばらくは、地震早期警報や即時強震動分布推定等への応用を意識しながら、地震防災への貢献と、後世へ伝えるに足る強震記録の取得の両方を行っていくことが重要と思われる。

謝 辞

香川敬生氏、芝 良昭氏、および編集担当の山中浩明氏には、本稿の改善あたって有益なご助言を賜りました。また、吉田康宏氏には気象庁の観測について教えて頂きました。木下繁夫氏には本稿執筆の機会を与えて頂きました。記して感謝いたします。

文 献

Aki, K., 1968, Seismic displacement near a fault, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5359-5376.
 Aoi, S., T. Kunugi, and H. Fujiwara, 2004, Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. JAEE*, **4**, 65-74.
 Aoi, S., T. Kunugi, and H. Fujiwara, 2008, Trampoline effect in extreme ground motion, *Science*, **322**, 727-730.
 Archuleta, R. J., J. Steidl, and M. Squibb, 2006, The COSMOS Virtual Data Center: A web portal for strong motion data dissemination, *Seism. Res. Lett.*, **77**, 651-658.
 防災科学技術研究所, 2007, リアルタイム地震情報の到達点と今後の研究の方向性について(中間報告)ー現状の分析と課題の抽出ー, 防災科学技術研究所.
 Clinton, J. F. and T. H. Heaton, 2002, Potential advantages of a strong-motion velocity meter over a strong-motion accelerometer, *Seism. Res. Lett.*, **73**, 332-342.
 Duenneiber, F. K. and G. H. Sutton, 1995, Fidelity of ocean

bottom seismic observations, *Mar. Geophys. Res.*, **17**, 535-555.
 Eguchi, T., Y. Fujinawa, E. Fujita, S. Iwasaki, I. Watabe, and H. Fujiwara, 1998, A real-time observation network of ocean-bottom-seismometers deployed at the Sagami trough subduction zone, central Japan, *Mar. Geophys. Res.*, **20**, 73-94.
 藤原広行・切刀 卓・安達繁樹・青井 真・森川信之, 2007, 新型 K-NET: 強震動データリアルタイムシステムの構築, 日本地震工学会論文集, **7**, 2-16.
 Fujiwara, H., N. Morikawa, Y. Ishikawa, T. Okumura, J. Miyakoshi, and N. Nojima, 2008, Verification of the national seismic hazard maps for Japan with actual observed strong motions by K-NET in last decade, Fifth International Conference on Urban Earthquake Engineering, 61-66.
 福和伸夫・小出栄治・糸魚川貢一, 2003, 建物観測用の普及型低コスト地震計の試作, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造 II, 871-872.
 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太・鈴木 裕, 1987, 機械式およびデジタル強震計の記録精度についてーSMAC 強震計記録の補正方法の検討ー, 京都大学防災研究所年報, **30**, B-2, 45-55.
 原田智史, 2007, 多機能型地震観測装置の概要, 験震時報, **70**, 73-81.
 林 能成, 1998, 1997 年伊豆半島東方沖群発地震活動とその発震機構ーケーブル式海底地震計の波形利用の検討ー, 修士論文, 東京大学大学院理学系研究科.
 土方勝一郎・野口厚子・植竹富一, 2006, 東京湾岸における広帯域強震観測, その 1 伊豆半島東方沖の地震による長周期後続波, 日本地震学会講演予稿集, 2006 年度秋季大会, 132.
 Holland, A., 2003, Earthquake data recorded by the MEMS accelerometer: Field testing in Idaho, *Seism. Res. Lett.*, **74**, 20-26.
 Horiuchi, S., H. Negishi, K. Abe, A. Kamimura, and Y. Fujinawa, 2005, An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 708-718.
 堀内茂木・山本俊六・中村洋光・呉 長江・Rydelek Paul・加地正明・加地宏行・西村新吾・野原和宏, 2007, ホームサイスマメータ普及計画, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会予稿集, S145-002.
 Hutton, K., E. Hauksson, J. Clinton, J. Franck, A. Guarino, N. Scheckel, D. Given, and A. Young, 2006, Southern California Seismic Network update, *Seism. Res. Lett.*, **77**, 389-395.
 今村明恒, 1926, 地震観測整備の一斑, 地震研究所彙報, **1**, 7-25.
 Ishimoto, M., 1931, Etude preliminaire sur l'acceleration des seismes, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **9**, 157-167.
 岩田知孝, 1991, 震源近傍の強震動とそれを用いた震源過程の推定, 地震 2 (特集号), **44**, 315-327.
 岩田知孝, 2009, 強震動予測のための特性化震源モデル, 地震 2, **61**, S425-S431 (本特集号).
 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, 1997 年 8 月 29 日.
 地震調査研究推進本部, 2008, 平成 20 年 (2008 年) 岩手・

- 宮城内陸地震の評価, 2008 年 6 月 26 日.
- 科学技術庁資源調査会, 1977, 地震危険度推定に必要な強震観測に関する勧告, 科学技術庁資源調査会.
- 金井 清, 1966, エンジニアリング・サイスモロジー, 地震 2, **19**, 23-30.
- 金田義行・川口勝義・荒木英一郎・松本浩幸・中村武史・神谷眞一郎・有吉慶介・堀 高峰・馬場俊孝, 2007, 南海トラフ紀伊半島沖の海底観測ネットワークの構築, 日本地震学会講演予稿集, 2007 年度秋季大会, 42.
- 菊地正幸, 1996, 大都市における高密度強震計ネットワーク, 科学, **66**, 841-844.
- Kinoshita, S., 1998, Kyoshin Net (K-NET), Seism. Res. Lett., **69**, 309-332.
- 木下繁夫, 1998, サーボ型地震計, 地震 2, **50**, 471-483.
- 木下繁夫・上原正義・斗沢敏雄・和田安司・小久江洋輔, 1997, K-NET95 型強震計の記録特性, 地震 2, **49**, 467-481.
- 気象庁, 1996, 震度を知る (気象庁・監修), ギョウせい, 238 pp.
- 気象庁, 2008, 推計震度分布図の迅速な発表について (報道発表資料), 2008 年 1 月 10 日.
- 額綱一起・三宅弘恵, 2009, 地下構造モデルと強震動シミュレーション, 地震 2, **61**, S441-S453 (本特集号).
- 工藤一嘉, 1994, 強震観測 - 現状と展望 -, 地震 2, **47**, 225-237.
- 切刀 卓・藤原広行・青井 真・安達繁樹, 2005, 加速度計による長周期地震動観測, 日本地震学会講演予稿集, 2005 年度秋季大会, 254.
- 切刀 卓・青井 真・中村洋光・藤原広行・森川信之, 2008, 震度のリアルタイム演算法, 地震 2, **60**, 243-252.
- 日下部毅明・村越 潤・上原浩明・松本俊輔, 2003, 土木構造物における加速度強震記録 (No.25), 国土技術政策総合研究所資料, **72**, 163 pp.
- 強震観測事業推進連絡会議, 1972, 強震計の全国的配置計画について, 国立防災科学技術センター.
- 強震観測事業推進連絡会議, 1977, 全国強震計設置状況一覧 (昭和 52 年 1 月 31 日現在), 国立防災科学技術センター.
- 強震観測事業推進連絡会議, 1983, 新型強震計に関する検討報告書, 国立防災科学技術センター.
- 強震観測事業推進連絡会議, 1984, 強震速報 28 1984 年 9 月 14 日長野県西部地震, 国立防災科学技術センター.
- 強震観測事業推進連絡会議, 1988, 強震計全国配置基本計画に関する報告書, 国立防災科学技術センター.
- 強震観測事業推進連絡会議, 1995, 強震速報 46 1995 年 1 月 17 日平成 7 年 (1995 年) 兵庫県南部地震, 科学技術庁防災科学技術研究所.
- 強震観測事業推進連絡会議・日本地震工学会, 2004, 記念シンポジウム「日本の強震観測 50 年」- 歴史と展望 - 講演集, 防災科学技術研究所研究資料, **264**, 防災科学技術研究所, 242 pp.
- 松本拓己・堀 貞喜・松林弘智, 2009, 広帯域地震観測 - 防災科研 F-net の 10 年 -, 地震 2, **61**, S9-S18 (本特集号).
- 翠川三郎, 2009, 地震動強さの距離減衰式, 地震 2, **61**, S471-S477 (本特集号).
- 村松郁米, 1995, 広帯域速度型強震計の開発とその記録範囲, 地震 2, **48**, 247-256.
- 中村洋光・山本俊六・堀内茂木・切刀 卓・青井 真・藤原広行・芦谷公稔, 2006, 表層地盤が P 波初動の振幅増加率に与える影響, 日本地震学会講演予稿集, 2006 年度秋季大会, 186.
- 日本学術会議, 1964, 耐震工学研究の強化拡充について (勧告), 日本学術会議.
- 日本学術会議, 1965, 耐震工学研究の強化拡充に関する勧告の実施について, 日本学術会議.
- 日本航空電子工業株式会社, 2007, 振動計測用加速度計 JA-40GA, 航空電子技報, **30**.
- 野津 厚・鈴木嘉秀・早田泰子・菅野孝弘, 2004, 港湾地域強震観測年報 (2003), 港湾空港技術研究所資料, **1084**.
- 小原一成, 2001, 最近の地震観測網整備について, 自然災害科学, **19**, 397-402.
- Odaka, T., K. Ashiya, S. Tsukada, S. Sato, K. Ohtake, and D. Nozaka, 2003, A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record, Bull. Seism. Soc. Am., **93**, 526-532.
- 太田 裕・岡田成幸・後藤典俊, 1980, わが国の強震観測の現状と改善の方向, 自然災害資料解析, **7**, 151-169.
- 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**, 15-28.
- 齋藤祥司, 2007, 東海沖から熊野灘に新たに整備するケーブル式海底地震計システムについて, 月刊地球, **29**, 516-522.
- 佐藤 京・池田憲二・金子孝吉・山本明夫・篠原秀明・佐々木克憲, 2001, 北海道開発局の地震情報伝達システム (WISE) による地震観測データを用いた距離減衰特性について, 地震工学研究発表会講演論文集, **26**, 209-212.
- 佐藤智美・川瀬 博, 2009, 堆積層による地震動の増幅, 地震 2, **61**, S455-S470 (本特集号).
- 清水喜久・小金丸健一・中山 渉・山崎文雄, 2001, 超高密度地震防災システム (SUPREME) の開発, 2001 年地域安全学会梗概集, **11**, 125-128.
- 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).
- 消防庁, 2006a, 次世代震度情報ネットワークのあり方検討会最終報告書, 消防庁.
- 消防庁, 2006b, やや長周期地震動に係る危険物施設の技術基準に対応した合理的改修方法の開発に関する調査検討報告書, 消防庁.
- 鈴木宏芳・池田隆司・御子柴正・木下繁夫・佐藤春夫・高橋 博, 1981, 関東・東海地域における孔井検層資料集, 防災科学技術研究所研究資料, **65**, 162 pp.
- 高橋龍太郎, 1953, SMAC 型強震計, 地震 2, **6**, 117-121.
- Takahashi, H. and K. Hamada, 1975, Deep-borehole observation of the Earth's crust activities around Tokyo - Introduction of the Iwatsuki observatory, Pure Appl. Geophys., **113**, 311-320.
- 鷹野 澄・伊藤貴盛・原 徹夫, 2004, IT 強震計 - その概念と試作 -, 日本地震学会講演予稿集, 2004 年度秋季大会, P001.

- 飛田 潤・福和伸夫・中野 優・山岡耕春, 2001, オンライン強震波形データ収集システムの構築と既存強震計・震度計のネットワーク化, 日本建築学会技術報告集, **13**, 49-52.
- Toki, K., K. Irikura, and T. Kagawa, 1995, Strong motion records in the source area of the Hyogoken-Nanbu earthquake, January 17, 1995, Japan, J. Natural Disaster Science, **16**, 23-30.
- 土岐憲三・澤田純男・中瀬 仁・杉山和久, 1987, SMAC 強震記録の長周期成分の補正方法について, 京都大学防災研究所年報, **30**, B-2, 19-26.
- 東京大学地震研究所 Seismic Kanto 研究グループ, 2002, 首都圏の強震動を解明する：首都圏強震動総合ネットワークと Seismic Kanto プロジェクト, 震災予防, **184**, 22-25.
- 東京電力株式会社, 2007, 東京電株式会社柏崎刈羽原子力発電所における「平成 19 年 (2007 年) 新潟県中越沖地震」の加速度時刻歴波形データ, 震災予防協会.
- 東京電力株式会社, 2008, 柏崎刈羽原子力発電所における平成 19 年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動に係る報告書, 東京電力株式会社.
- 東田進也, 2009, 地震情報の現状と課題, 地震 2, **61**, S575-S589 (本特集号).
- 東田進也・小高俊一・芦谷公稔・大竹和生・野坂大輔, 2004, P 波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法, 地震 2, **56**, 531-361.
- 宇津徳治, 1999, 地震活動総説, 東京大学出版会, 876 pp.
- 若山晶彦・藤沢 格・遠山忠昭・神定健二, 1989, 気象庁における電磁式強震計観測の現状, 地震学会講演予稿集, **1**, 115.
- 座間信作, 2009, 長周期地震動, 地震 2, **61**, S433-S440 (本特集号).