

シリーズ「新・強震観測の最新情報」

(第5回) 建築研究所の強震観測

国立研究開発法人建築研究所 鹿嶋俊英

はじめに

建築研究所が強震観測網の整備を始めたのが1957年であり、建築研究所の強震観測の歴史は60年を超えた。建築研究所の強震観測の目的は建物の耐震安全性の向上に資することであり、そのための観測の対象は地盤や各種構造物と幅広い。本稿では建築研究所の強震観測の現状を紹介する。

強震観測網

現在の強震観測点を図1に示す。現在稼働中の観測点は84か所である。過去には、日本全国を網羅すべく観測網を整備していた経緯があり、北海道から九州までの主要な都市に観測点が配置されている。一方で、観測対象は基本的に建物であるので、近年は建物の規模と種類が豊富な都

市部での観測事例が増えている。その結果、東京を中心とする関東圏にはほぼ1/3の数の観測点が展開されている。

強震観測体制

建築研究所の強震観測の目的は建物の耐震安全性の向上に資することであり、このためには地震動特性の評価、地震入力機構の解明、建物の動的挙動の理解などが必要となる。地盤系の観測は気象庁、防災科学技術研究所、地方自治体などの充実したネットワークがあるので、建築研究所は地震入力機構の解明や建物の動的挙動の理解に絞った観測を行っている。

建物などの構造物の強震観測では、対象構造物の振動特性を把握するために、最低限入力と応答を測定する必要があるため、最低2点の測定点となる。構造物の規模や特性

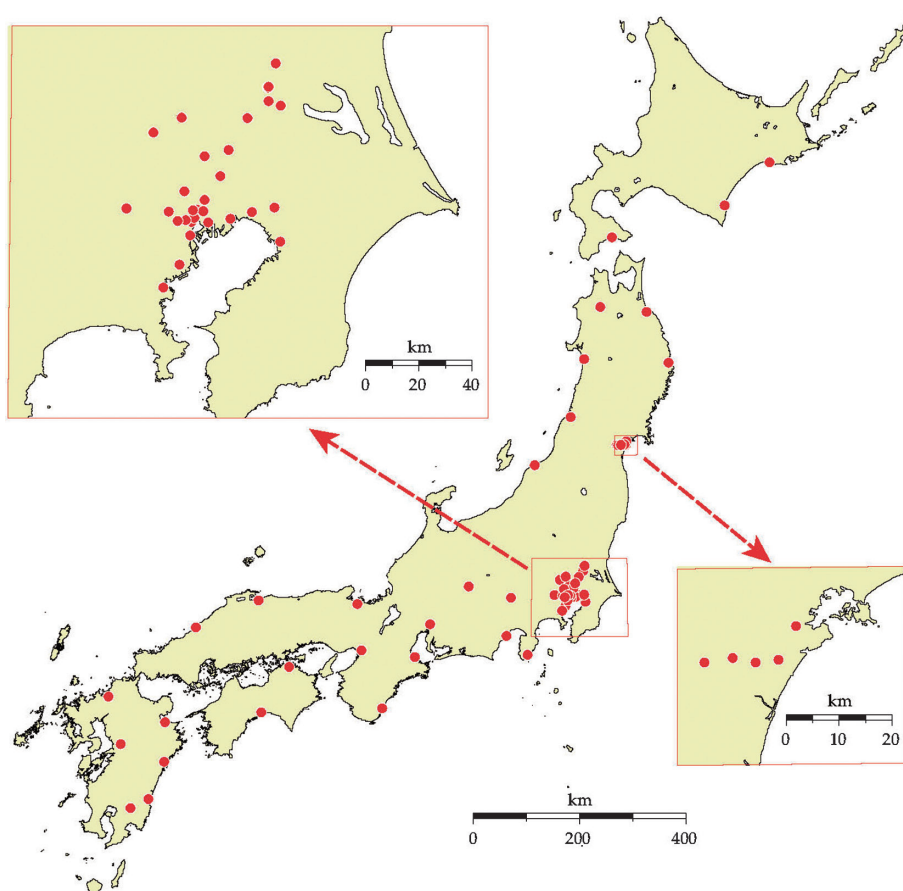


図1 建築研究所の強震観測点

表 1 主な強震計の特性

製造者	アカシ	ミットヨ	国際計測器	東京測振	東京測振
モデル	SMAC-MD	SMAC-MDU	KSG	VIP-19	CV-374
センサ型式	V401	V403	TA25D	AS-303	SQ-32
測定範囲	±1G	±2G	±2G	±3G	±2G
周波数範囲	0.02~30 Hz	DC~30 Hz	DC~40 Hz	DC~100 Hz	DC~100 Hz
AD 変換器	16-bit	24-bit	24-bit	24-bit	24-bit
時刻校正	NHK 時報	NHK 時報/GPS	NHK 時報/GPS	GPS/NTP	GPS/NTP
通信手段	電話回線	電話回線	電話回線	Internet	Internet
使用開始年	1988	1996	1996	2010	2009

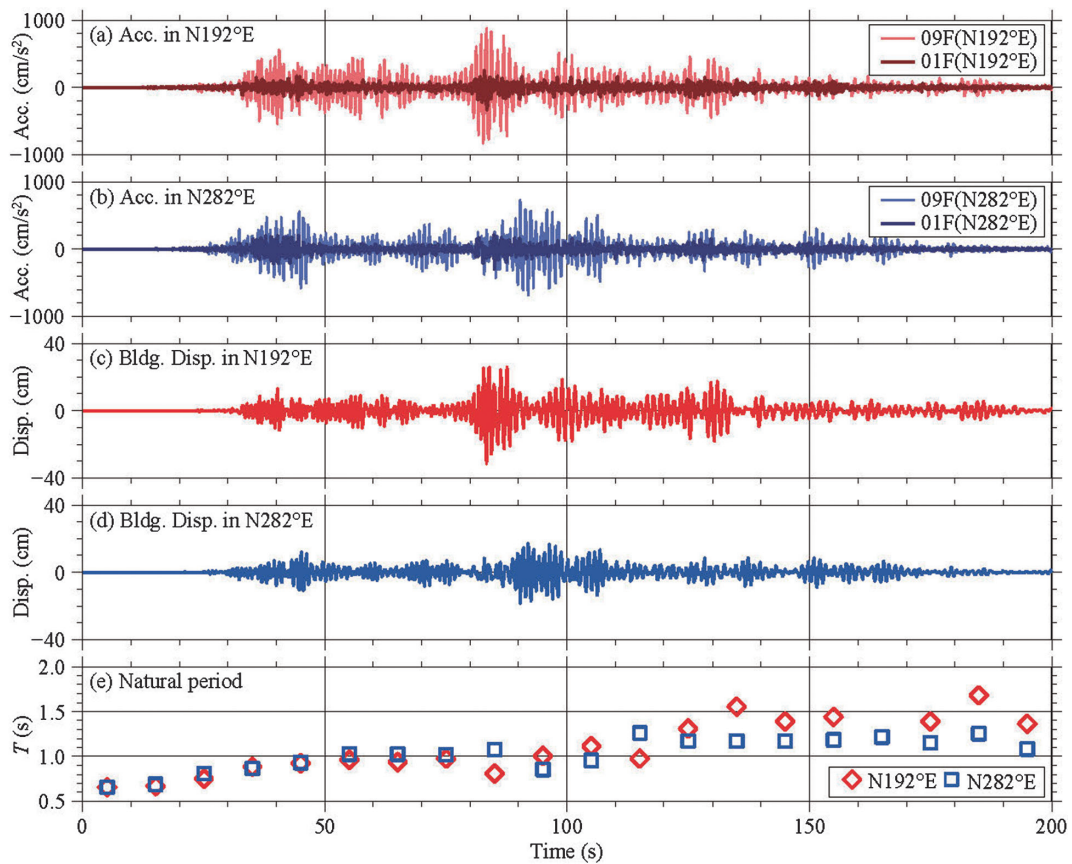


図 2 2011 年東北地方太平洋沖地震の際、東北大学人間環境系研究棟で得られた (a) (b) 加速度記録, (c) (d) 建物の変位, 及び (e) 固有周期の変化

によっては、さらに多くの測定点が必要となる。建物の場合、規模や構造、地盤条件や基礎形式など様々な条件がその地震応答に影響を及ぼすので、これらのバリエーションも考慮して観測点や観測体制を選択している。

強震観測機器

建築研究所の強震観測網では数種類の強震観測機器を用

いている。表 1 に主な強震計の特性を示す。SMAC-MD は 1980 年代後半から導入した初期のデジタル強震計であり、古いものでは 40 年近く稼働している。SMAC-MDU は SMAC-MD の後継機として開発された 24 bit の AD 変換器を有する強震計で、1996 年ごろから導入された。KSG も SMAC-MDU とほぼ同様の性能を有し、同時期に導入された。これらの強震計は、通常 1 台 (3 成分) の加速度計を

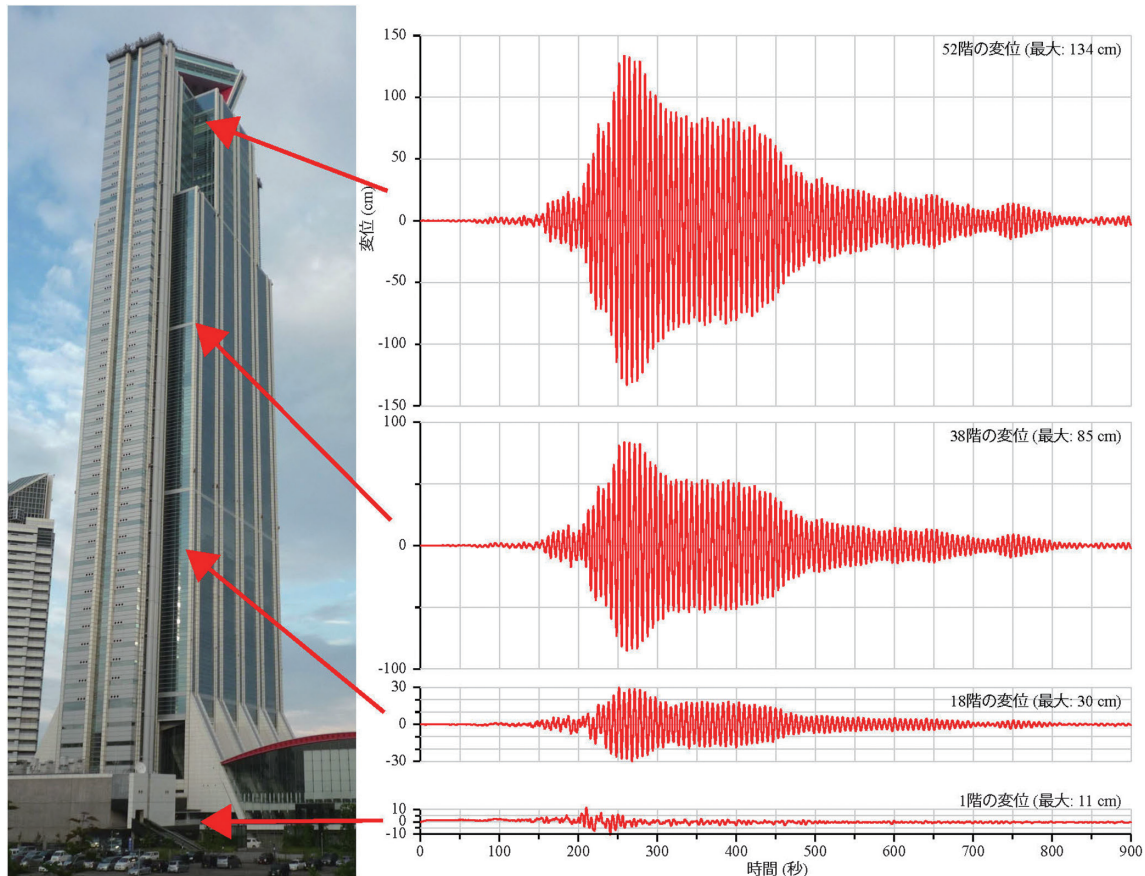


図 3 2011 年東北地方太平洋沖地震の際、大阪湾岸に建つ 55 階建て超高層建物で得られた変位波形（建物短辺方向（N229° E）成分，加速度から積分）

内蔵し，加えて 2 台から 5 台の外部加速度計を接続することができる。強震記録は強震計内のメディアに一括で収録される。一方 CV-374 は，1 台の加速度計を内蔵したコンパクトな強震計で，外部加速度計は接続できない。このため多点の観測では複数台の CV-374 を用いることになる。この場合強震記録は各強震計内のメディアに収録される。

これらの強震計は，原則イベントトリガ方式で稼働している。すなわち，あるトリガレベルを感知すると一定時間強震記録を収録する。トリガレベルは建物の基礎に近い加速度計で設定し，通常 2 gal から 4 gal で設置状況によって変えている。一方，VIP-19 や CV-374 ではトリガ記録に加え連続記録も収録している。

波形収集システム

1990 年代に導入した強震計は，外部インターフェイスがシリアルポート（RS-232C）となっており，モデムを繋いで公衆電話回線を通じてアクセスしている。最近の強震計はイーサネットに対応しており，建築研究所との通信は Internet を通じて行う。オンラインでの記録の収集は定期的に，あるいは大きなイベントの直後に手動で行っている。

記録の提供

観測された強震記録はデータベース化して，ウェブ上で公開している (<https://smo.kenken.go.jp/>)。地盤上や建物の下部で観測された強震データはウェブサイトから直接ダウンロードが可能である。その他，建物の上部も含めた強震データは，一部を除いて，書面による申請を行うことによって利用することができる (<https://smo.kenken.go.jp/ja/useofdata>)。

顕著な記録の例

ここでは 2011 年東北地方太平洋沖地震で得られた 2 つの強震記録を紹介する¹⁾。

ひとつは東北大学の青葉山キャンパスにあった SRC 造 9 階建ての人間環境系研究棟での記録である。この建物の 1 階と 9 階で得られた加速度記録を図 2 (a)，(b) に，9 階の変位から 1 階の変位を引いて求めた建物の相対変位を図 2 (c)，(d) に示す。加速度波形の濃い太線は 1 階の，薄い細線は 9 階の波形である。また，N192° E は建物の短辺方向，N282° E は長辺方向に対応する。更に，図 2 (e) には，10 秒ごとの建物の固有周期を強震記録から求めて

プロットしている。これらの図からは、地震動には30秒過ぎと80秒過ぎに到来するふたつの振幅の大きな波群があったこと、最初の波群で建物はいくらか損傷し固有周期が若干伸びたこと、二番目の波群で更に損傷が進行し、建物の変形は30cmを超えていることがわかる。この建物は大破と判定され、2012年に取り壊された²⁾。

この建物では、1978年宮城県沖地震の際に、当時設置されていたSMAC-M型強震計が9階で1Gを超える記録を捉えたのをはじめ、長期に渡って強震観測が行われてきた。この間に幾度も大きな地震動を経験し、耐震補強もされてきた。長期間にわたる観測が、容易には得がたい知見を与えてくれた代表例と言える。

もう一つは、震央から770km離れた大阪湾岸に建つ55階建ての超高層建物の地震応答である。この建物の1階、18階、38階、及び52階の変位波形（強震記録を積分したもの）を図3に示す。建物の上層部ほど、建物の固有周期である7秒弱の揺れが大きく増幅しているのが分かる。1階の最大加速度は30gal強、最大変位は11cm程度であっ

たが、52階の最大加速度は130galを超え、変位は130cm以上に達し、また大きな揺れが10分以上続いた。建物の固有周期と地震動の卓越周期が一致した共振現象と、建物自体の減衰が小さかったことが大きな揺れの原因だが、長周期地震動対策の重要性を再認識させるものであった。この建物ではその後、制振耐震改修工事が行われている。

参考文献

- 1) 鹿嶋俊英・小山 信・大川 出, 2012, 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震における建物の強震観測記録, 建築研究資料, 135, 独立行政法人建築研究所, 142pp.
- 2) Motosaka, M., *et al.*, 2015, Long-term Monitoring of Amplitude Dependent Dynamic Characteristics of a Damaged Building during the 2011 Tohoku Earthquake, Journal of Association for Earthquake Engineering, 15 (3), 1-16, https://doi.org/10.5610/jaee.15.3_1.

(第6回) 東京大学地震研究所の強震観測

東京大学地震研究所 三宅弘恵・瀬戸一起・古村孝志・宮川幸治・安藤美和子・八木健夫

はじめに

東京大学地震研究所では1953年に強震観測が開始され、1956年の東京101(101は東京大学地震研究所の観測点番号)に代表される設計用入力地震動となる記録を観測してきた。これらの強震観測は日本学術会議の勧告等に基づいて、伊豆駿河湾や足柄平野を中心に岩盤サイトやボアホールといった強震動解析の要となる観測点を基盤としつつ、堆積平野や堆積盆地におけるアレイ観測や建築構造物を対象とする強震観測に発展し、強震動の包括的理解を目指した強震観測網として構築・運用されてきた¹⁾⁻⁵⁾。その後、南関東や信州にも強震観測網が展開され、現在は図1に示す66観測点となっている。

強震観測システム

定常強震観測網は、伊豆駿河湾17点、足柄平野15点、南関東6点、信州24点(うち20点は信州大学との共同強震観測点)、名古屋名駅観測点、首都圏強震動総合ネットワークSK-netの基盤観測点3点から構成されており、全66観測点中51点がダイヤルアップや携帯電話通信を主体としてオンライン化されており、残り15点が現地収録のオフライン点である。主な特性を表1に示す。観測網の大多数はトリガー観測であるが、連続観測へ移行中であり、

連続観測点は11点ある。トリガー観測点のうち地表のみの観測点では、ASI-230を用いている富士川地殻変動観測所観測点を除き、JEP-4A3またはK-NET95のセンサーとK-NET95のレコーダーを用いている。うち、14観測点では、トリガーレベルを変えた複数の強震計を併設している。地中と地表で観測を行うボアホール観測点では主に、地中にJEP-4B3、地表にJEP-4A3あるいはSMAC-MDUのセンサーを設置し、SMAC-MDUのレコーダーで観測している。また、東京大学地震研究所観測点や小田原市の西湘高校観測点では建物を含めた多チャンネル強震観測を展開しており、AJE-8200のレコーダーで収録している。連続観測点の多くはJEP-8A3のセンサーとHKS9700のロガーで収録するとともに、携帯電話通信を用いて毎秒WINパケットを送信しており、ダイヤルアップデータおよび連続観測データはともに東京大学地震研究所で受信している。

顕著な記録の例

観測網展開から数十年を経た2011年東北地方太平洋沖地震において全観測点がトリガーされ、足柄平野の成田観測点や南足柄観測点において、周期2~3秒に極めて大きな応答を有する強震記録が得られた。このような大きな応答は関東平野では見られず、足柄平野の戸建免震に影響を

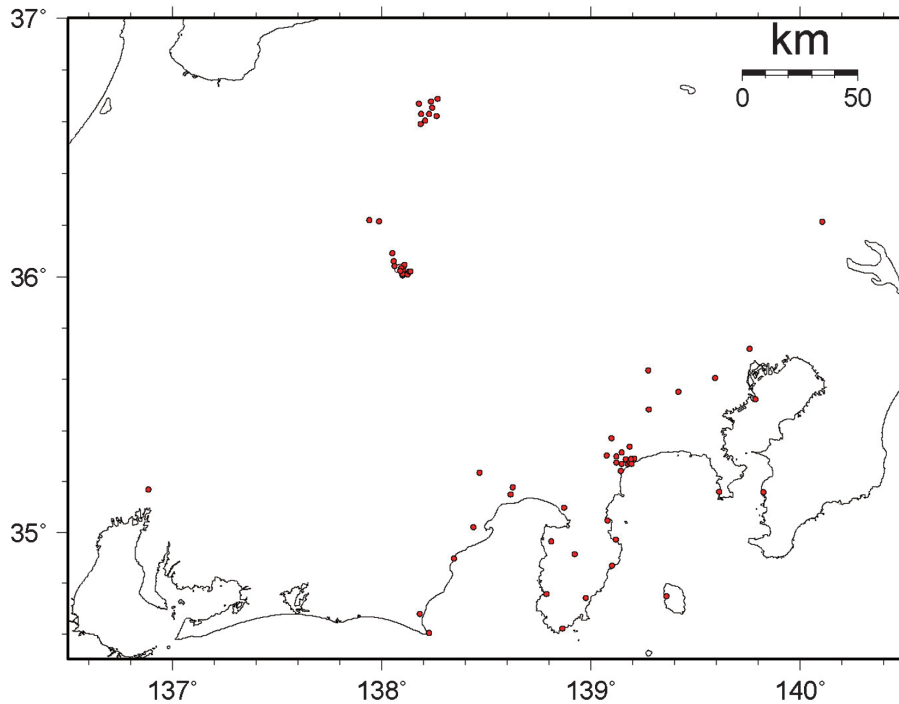


図 1 東京大学地震研究所の強震観測点分布 (2020年4月1日現在)

表 1 主な強震計の特性

収録部	K-NET95	ASI-230	SMAC-MDU	AJE-8200	HKS-9700	LF-1100R/ LF-2000R	LS-7000XT
センサ部	K-NET95 (内蔵) JEP-4A3 (外付け)	ASI-230 (内蔵)	SMAC-MDU (内蔵) JEP-4A3 (外付け) JEP-4B3 (ボアホール) ME-93STA (ボアホール) SA-355CT (ボアホール)	JEP-4A3 (外付け) JEP-4B3 (ボアホール)	JEP-8A3 (外付け)	EpiSensor (外付け) ME-93STA (ボアホール)	VSE-311F (外付け)
測定範囲	±2G	±2G	±2G	±2G	上下±2G, 水平±3G	±1G (1点のみ ±4G)	±200 kine
サンプリング 周波数	100 Hz	100 Hz	100 Hz	100 Hz	100 Hz	100 Hz	100 Hz
周波数範囲	DC~30 Hz	DC~30 Hz	DC~30 Hz	DC~30 Hz	DC~40 Hz	DC~40 Hz	0.012~40 Hz
AD 変換器	24 bit	24 bit	24 bit	24 bit	27 bit	24 bit	24 bit
時刻校正	GPS	GPS	GPS	GPS	GPS	GPS	GPS
観測方式	トリガ観測	トリガ観測	トリガ観測	トリガ観測	連続観測	連続観測	連続観測
通信手段	電話回線・ 携帯電話通信	学内 LAN	電話回線・ 携帯電話通信	電話回線	携帯電話通信	フレッツ回線	学内 LAN
観測点数(※)	42	1	15	3	6	4	1

※ 1つの観測点に異なる種類の強震計を複数設置していることもある

2011/03/11 14:46:36

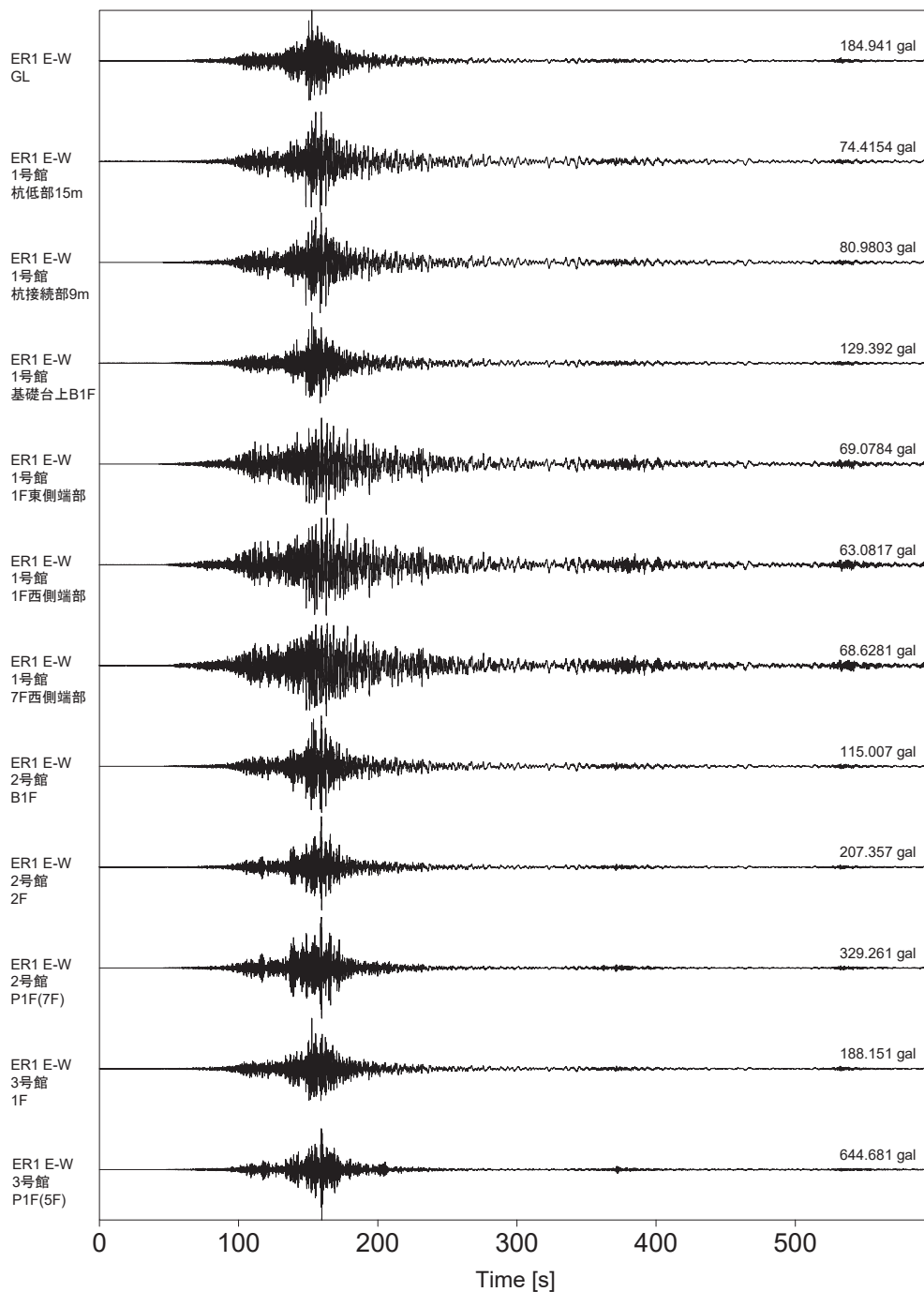


図 2 2011 年東北地方太平洋沖地震時の東京大学地震研究所における加速度記録。地中、地表、及び建物に設置された 12 箇所の地震計記録 EW 成分。

与えた可能性が検討されている。また、地震研究所では免震建屋地盤系を含む総合強震観測システムが機能し、図 2 の観測記録が得られた。

データ公開

2008 年より東京大学地震研究所強震観測データベース

(<http://smsd.eri.u-tokyo.ac.jp/smad/>) を構築し、データ公開を開始した⁶⁾。1980 年以降の定常強震観測、近年の被害地震の臨時強震観測、2004 年以降の信州大学との共同強震観測のデジタル記録については、対象地震ごとに K-NET フォーマットのトリガー記録が公開されている。また、強震観測データベースには、東京大学地震研究所が保

管している 1956 年から 1995 年に至る SMAC 型強震計記録の画像データも公開されている。これらは紙記録のうち、マグニチュードが大きいまたは加速度が大きい波形記録のスキャン画像であり、東京 101 の記録や 1995 年兵庫県南部地震の記録も含まれる。加えて、吉澤ファイル⁷⁾のデジタル記録や 1964 年新潟地震の川岸町のデジタル記録⁸⁾も公開されている。

参考文献

- 1) 田中貞二, 2005, わが国の強震観測事始めを振り返って—加速度強震計の開発と初期および発展期の強震観測—, 防災科学技術研究所研究資料, **264**, 7-16.
- 2) 工藤一嘉, 1994, 強震観測—現状と展望—, 地震 **2**, **47**, 225-237, https://doi.org/10.4294/zisin1948.47.2_225
- 3) 工藤一嘉・瀨瀬一起・高橋正義・坂上 実, 1998, 地震研究所の強震観測, 日本地震学会ニュースレター, **11** (3), 16-18.
- 4) 坂上 実・高橋正義, 1998, 強震観測室の変遷と現状—観測点選定・観測点建設・強震計設置について—, 東京大学地震研究所技術研究報告, **2**, 102-119.
- 5) 坂上 実, 2011, 地震研究所における強震動観測の変遷と現状, これから, 東京大学地震研究所技術研究報告, **17**, 77-94.
- 6) 三宅弘恵・瀨瀬一起・古村孝志・宮川幸治・田中伸一, 2018, 東京大学地震研究所の強震観測網と強震観測データベース, 第 15 回日本地震工学シンポジウム論文集, 3306-3311.
- 7) 吉澤静代, 1991, 強震記録のデジタル・データ, 強震観測資料, 91pp, http://smsd.eri.u-tokyo.ac.jp/smad/smac/YoshizawaFile_199103.pdf
- 8) Kudo, K., T. Uetake, and T. Kanno, 2000, Re-evaluation of nonlinear site response during the 1964 Niigata earthquake using the strong motion records at Kawagishi-cho, Niigata city, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, No.0969.