

建物の強震観測

鹿嶋 俊英

強い地震時の建物や地盤の揺れを計測しようとするのが、強震観測である。日本における強震観測の歴史は60年を超えた。この間、繰り返し発生した被害地震では、多くの貴重な強震記録が得られ、地震工学や耐震工学の発展に重要な役割を果たしてきた。本稿では、国立研究開発法人建築研究所の強震観測の歴史を振り返り、その観測網の強震記録から得られた知見を概観する。

キーワード：強震観測，強震計，振動特性，耐震安全性

1. はじめに

強い地震時の建物や地盤の揺れを計測しようとするのが、強震観測である。実際の地震時に建物を支える地盤がどのように揺れ、その上に建つ建物がどのように応答するかを知ることは、建物の耐震安全性を考慮するうえで欠かせない。

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年を数えた。建築研究所の強震観測の歴史は日本の強震観測の歴史とも重なる。本稿では、建築研究所の強震観測の歴史を振り返り、1990年代以降に強震観測で得られた成果と、強震記録の分析から得られた知見を紹介する。

2. 強震観測の歴史

2.1 強震計の開発と建築研究所の役割

1948年福井地震を契機に、大地震時の地盤や建物の揺れを測定することの必要性が痛感され、1951年に東京大学地震研究所、東京大学建築学教室、建築研究所、明石製作所の研究者と技術者によって標準強震計試作試験研究委員会が組織された[1]。この委員会は、いかなる大地震にも耐えうる実用的な強震計の開発を目指し、強震計の設計、試作、試験を行った。1951年9月には試作機の公開実験が、当時新宿区百人町にあった建築研究所で行われている[2]。1953年3月には標準型強震計の1号機が完成し、委員会の名称(Strong Motion Accelerometer Committee)からSMAC型強震計と名づけられた[1]。SMAC型強震計を図1に示す。

SMAC型強震計は、水平2成分、鉛直1成分の計



図1 SMAC型強震計

3成分の振り子式の加速度センサーを有している。振り子式の加速度センサーは重さ6kgの錘に板バネと空気減衰器をもたせたもので、錘の動きを梘子で拡大し、ロール紙上のペンを動かす。地震を感知するとロール紙が自走するので、加速度の変化は波形としてロール紙上に描かれる仕組みとなっている。

2.2 日本で最初の強震観測網の構築

強震計の開発が成功し、その関係者の熱心な働きかけから強震観測の重要性が認められ、総理府資源調査会は1955年に「強震測定計画に関する勧告」を行う。この勧告は気象官署、建築土木構造物を対象に116カ所413台の強震計の設置を求めている[3]。これを受けて1956年から1957年に建設省で予算措置がなされて25台の強震計が設置され、その強震計の移管を

かしま としひで
国立研究開発法人建築研究所 国際地震工学センター
〒305-0802 茨城県つくば市立原1
kashima@kenken.go.jp

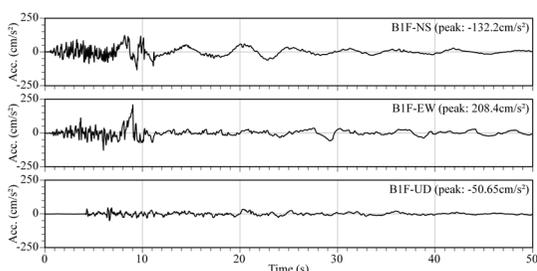


図2 1964年新潟地震・川岸町アパート地下階の強震記録 [4]

受けて建築研究所が建物を対象とした全国的な観測網を展開して行くこととなった。以来、現在まで途絶えることなく、建築研究所は強震観測網の維持管理と充実を図ってきた。

2.3 1964年新潟地震の強震記録

強震観測が、最初にその威力を知らしめたのは、1964年の新潟地震である。新潟市川岸町にあった県営アパートは、地盤の液状化によって、転倒や傾斜する被害を受けた。傾斜したアパートの一つに建築研究所の強震計が設置してあり、見事に強震記録を採取することができた。この記録については、その後も再数値化され、長周期地震動の検討に用いられたりしている [4]。アパート地下階で得られた1964年新潟地震の再数値化された強震記録を図2に示す。この強震記録によって、強震観測の有用性が実証され、その後の各機関の強震観測網の構築や増強を推進することとなった。

2.4 現在に至る強震計の改良・開発

最初に開発されたSMAC型強震計は、頑強で信頼性の高い機器であった。一方で、幅84cm、奥行き74cm、高さ56cm、重さ300kgと大きく重く、また高価であった。本格的な強震計の普及のために、引き続き改良が加えられ、多くの後継モデルを生み出した。その過程で強震計の小型化、軽量化が図られてきたが、1960年代までは、基本的にはSMACのシステムを踏襲する振り子式のセンサーを用いた機械式の強震計が主流であった。

1970年代に入ると、強震計も「電化」が図られる。1973年ごろから導入が始まったSMAC-M型強震計は、サーボ型の加速度センサーを有し、加速度記録は終始電氣的に処理され、フィリップス型のコンパクトカセットテープに収録される。サーボ型の加速度センサーは、従来の機械式のセンサーに比べ、極めて小型軽量であるにもかかわらず、観測記録の大幅な質の向上を実現した。また、機械的な機構の排除とカセットテープの採用は、強震計本体の小型化を実現し、強震



図3 SMAC-M型強震計

計や観測記録の取り扱いを容易にした(図3)。

1980年代には、強震計にもデジタル化の波がくる。加速度センサーの信号を早い段階でデジタル化して、以降の処理はデジタル信号として扱う。収録もデジタル記録としてメモリカードなどに書き込む。デジタル化のメリットは数多いが、従来のロール紙の上に描かれた記録やカセットテープ上の電磁記録はデジタル化処理をしなくてはコンピュータ上で扱えなかったが、この手間がなくなったことが最も大きい。またデジタル記録であれば遠隔であっても、何らかの通信手段を使って容易に記録の転送が可能となる。つまり、デジタル化によって多大な省力化が実現され、データ処理の迅速化が図られた。図4は、SMAC-MD型と呼ばれる初期のデジタル強震計である。16ビットのAD変換器を採用し、自動校正可能な時計、メモリカード記録、遅延記録、通信機能、任意の条件での起動停止設定など、現代の強震計が有する標準的な機能はすべて備えていた。また、複数の測定点を測りたいときは外部加速度計を増設できるなど、拡張性にも優れている。

その後も、分解能の向上やインターネットなど新しい通信技術への対応など、強震計は進化を続けている。現在、建築研究所では、複数の種類のデジタル強震計を使い分けている。

3. 建築研究所の強震観測網

1957年に始まった建築研究所の強震観測網の構築は、全国の主要な都市に建つ、国や地方自治体の庁舎などに設置する形で構築されてきた。いつ、どこで発生するかわからない地震に備えるため、広く網を張る考え方であり、現在でもベースとなっている。

一方で、建築研究所は1983年より仙台高密度強震観測を開始する。これは、特に表層地盤が地震動に与える影響を解明するために、地中と地表に加速度計を有



図4 SMAC-MD型強震計

する強震観測装置を、仙台市とその周辺に高密度に配置したものである。当初、建築研究所単独のプロジェクトであったが、1987年からは官民共同研究として観測地点の整備が進められ、1989年に計11観測地点の観測網が完成した。各観測地点の強震観測装置は3台の加速度センサーを有しており、それぞれ地表、工学的基盤上、およびその中間深度に埋設された。官民共同研究としての観測は1999年まで続き、得られた強震記録は地盤増幅の定量的な評価手法の開発に利用された。

また、1995年兵庫県南部地震を受け、大都市圏の地震防災対策に資することを目的に、首都圏地震動観測網を構築した。これは東京を中心とした首都圏に20カ所の観測地点を新たに設けたものである。観測の対象は建物であり、可能であれば建物と敷地地盤の同時観測を行っている。

さらに2013年には、2010年から2012年にかけて実施された国土交通省の建築基準整備促進事業で整備された六つの観測地点を買い取り、建築研究所の強震観測網に加えた。これらの観測地点は、長周期地震動に対する鉄筋コンクリート造建築物、鉄骨造建築物、および免震建築物の安全性検証方法に関する検討のために設けられたもので、東京、名古屋および大阪に建つ超高層鉄筋コンクリート造2棟、超高層鉄骨造2棟、免震構造2棟となっている。

このような経緯があり、また従来からの観測網も随



図5 建築研究所の強震観測地点

時見直しと改廃を行っており、現在の建築研究所の観測地点は計87カ所となっている。図5に建築研究所の観測地点の位置を示す。仙台市とその周辺には、仙台高密度強震観測で整備した観測地点が一部残っている。また、東京を中心とした関東地域には、首都圏地震動観測網として整備した観測地点があり、一段と観測密度が高くなっている。ほとんどの強震計は、電話回線やインターネットを通じて建築研究所と結ばれており、観測パラメータの変更や記録の回収は遠隔で行える。

各観測地点の観測対象による分類を図6に示す。分類を「地盤」としたのは純粋に地盤上や地中にセンサーが配置されている観測地点である。分類が「建物基部のみ」の観測地点では、低層建物の地下階や1階に1台のセンサーを有している。あわせて19地点では分類が「地盤」あるいは「建物基部のみ」となっており、その地域の地震動の特性を知るための観測となる。分類を「建物」としたのは、少なくとも建物の頂部（屋上階や最上階）と基部（最下階や1階）に加速度センサーを有し、建物によってはさらにセンサーが追加されている観測地点である。半数近くの観測地点ではこのような観測体制となっており、その強震記録からは地震時の対象建物の動的な挙動が検討できる。分類を「建物と地表」としたのは、建物内の複数のセンサーに加え、地盤上にもセンサーを有する観測地点である。地盤と建物の相互作用によって、地表で観測される地震動と建物に作用する地震動は異なるので、そのような現象を解明するための観測体制となっている。さらに、分類が「建物と地盤」となっている観測地点では、「建

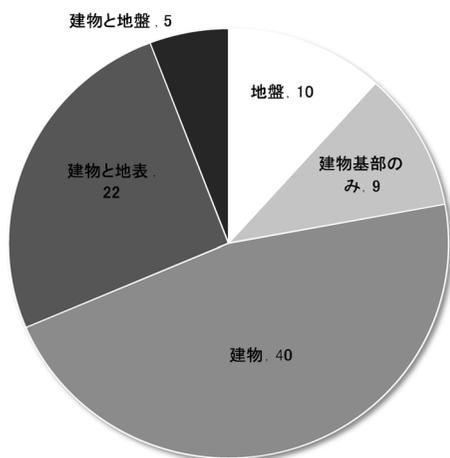


図6 建築研究所の強震観測地点の観測対象による分類

物と地表」に加えて、地中にもセンサーを配している。地盤増幅、地盤と建物の相互作用、および建物の地震応答を総合的に捉えることができる。

4. 主な地震の観測記録とその影響

前述のように、1990 年前後からデジタル強震計の導入が始まり、センサーと計測技術の進歩は強震記録の質の向上をもたらした。また、小地震の強震記録も分析が可能となったため収録する強震記録の量も大幅に増加した。本節では、デジタル強震計導入以降の主な地震によって得られた強震記録と、強震観測に与えた影響を振り返る。

4.1 1993 年釧路地震

1993 年 1 月 15 日に発生した釧路沖地震 (M7.5, 深さ 101 km) は、デジタル強震計の威力を見せつける最初の地震となった。建築研究所が釧路地方気象台の地盤上に設置していた強震計は、1990 年に SMAC-M 型からデジタル式の SMAC-MD 型に置き換えられていた。この強震計は、最大加速度が 711 gal (ガル, cm/s^2) に達する大加速度の強震記録を採取した (図 7)。

気象台の周辺の建物には目立った被害がなかったことから、大加速度地震動の生成要因と、地震動特性と周辺被害との関係に大きな関心が集まり、産学官が連携した大がかりな調査が行われた (たとえば文献 [5])。またこの地震を契機に、補正予算を得て、建築研究所の強震観測網の強震計のデジタル化が進んだ。

4.2 1995 年兵庫県南部地震

1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震は、日本の強震観測にとってエポックメイキングな地震であった。建築研究所の強震観測網では、大阪や松阪、舞鶴な

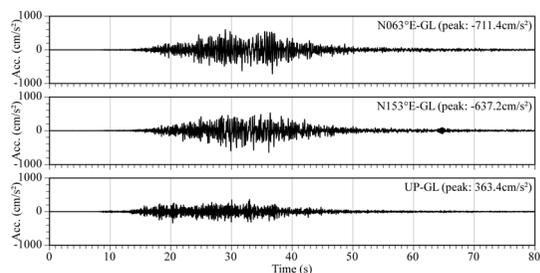


図7 1993 年釧路沖地震・釧路地方気象台地表の強震

ど周辺の観測地点で良好な強震記録が得られたが、神戸市内などの被災地には建築研究所の強震観測地点はなかった。また、神戸市内でも、場所によって被害の様相が大きく異なり、都市域の地盤状況に応じた密な観測の必要性が再認識された。この経験が前述の首都圏地震動観測網の構築に繋がった。また、情報収集の確度と速度の改善も課題として浮上し、ほぼすべての観測地点を電話回線で結ぶテレメータ化を実現した。

日本の強震観測の世界では、防災科学技術研究所の K-NET や KiK-net, 各都道府県の震度情報ネットワークが新たに構築され、気象庁の震度観測網も大幅に増強された。これらの観測網は、基本的には地表の地震動を観測するものであり、総計で 5,000 を超える観測地点が日本全国を覆うこととなった。ちなみに、気象庁震度は、それまでの体感によるものから、強震計で得られた加速度記録を処理して算出する方式に改められた。

4.3 2011 年東北地方太平洋沖地震

2011 年東北地方太平洋沖地震の強烈な地震動とその未曾有の地震と津波の被害は、未だ生々しい記憶である。3 月 11 日 14 時 46 分に牡鹿半島の東南東沖、約 130 km で発生した M9.0 の巨大地震は、北は北海道から、南は九州のいくつかの地点に至るまで、日本列島のほとんどの地域を揺らした。

建築研究所の強震観測網では、当時稼働中であった 79 の観測地点のうち 61 の観測地点で強震記録が得られた [6]。図 8 に、強震記録が得られた観測地点の位置を示す。観測地点の位置を示す○の色は、計測震度によって色分けされており、濃い色の地点は大きな震度を記録した地点である。建築研究所の強震観測地点では、震度 6 弱が 1 地点、震度 5 強が 17 地点、震度 5 弱が 18 地点であった。多くの観測地点では、観測開始以来最強の地震動を経験したことになり、これらの強震記録の分析によりさまざまな新たな知見が得られた。その一部については、次節で紹介したい。

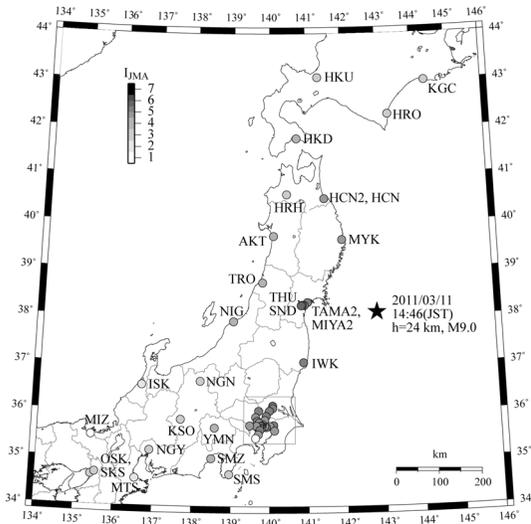


図 8 2011 年東北地方太平洋沖地震で強震記録が得られた観測地点

5. 強震記録が明らかにした建物の地震応答

2011 年東北地方太平洋沖地震やその余震では、多くの建物の強震記録が得られ、その分析が進んだ。ここでは、以降に明らかにされた特徴的な建物の地震応答を整理する。

5.1 長周期長時間地震動と長周期構造物

2003 年十勝沖地震で注目を浴びた長周期地震動だが、2011 年東北地方太平洋沖地震では、東京や大阪の長周期構造物（超高層建物や免震構造など固有周期が長い構造物）が長周期地震動を実際に体験することになる。建築研究所の強震観測記録の分析からは、仙台市に建つ超高層建物は 3 分以上、首都圏の超高層建物は 5 分以上大きな揺れが継続したことがわかる [6]。

特筆すべきは、震央から 770 km も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、および 52 階の変位波形（強震記録を積分したもの）を図 9 に示す。建物の上層部ほど、揺れが大きく増幅しているのがわかる。1 階の最大加速度は 30 gal 強、最大変位は 11 cm 程度であったが、52 階の最大加速度は 130 gal を超え、変位は 130 cm 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。この建物はその後、制振耐震改修が行われている。

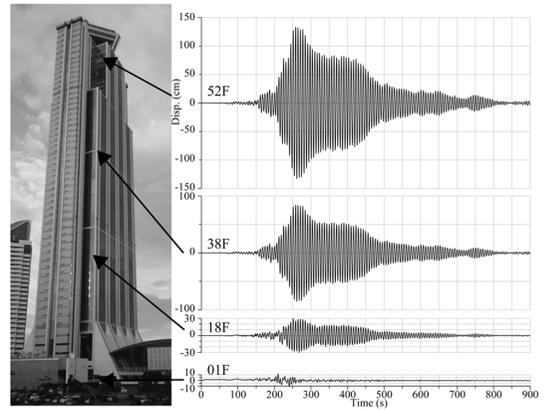


図 9 2011 年東北地方太平洋沖地震・大阪湾岸に建つ超高層建物の地震応答変位



図 10 東北大学人間環境系研究棟の被災状況

5.2 建物被害と建物の応答

建築研究所の強震観測網の中には、2011 年東北地方太平洋沖地震によって、構造的な被害を受けた建物が複数存在した。このような建物で得られた強震記録は、被災の過程を検証するうえで貴重なものである。建築研究所が強震観測を行っている建物の中で、最も甚大な被害を受けたのは、東北大学の青葉山キャンパスにあった SRC 造 9 階建ての建物である。図 10 に示すように、セットバックしている 3 階で妻壁が破壊した。

この建物の 1 階と 9 階で得られた加速度記録を図 11 の上段二つの図に、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 11 の中段二つの図に示す。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。さらに、図 11 の下段には、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 秒過ぎに到来する二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、二番目の波群でさらに損傷

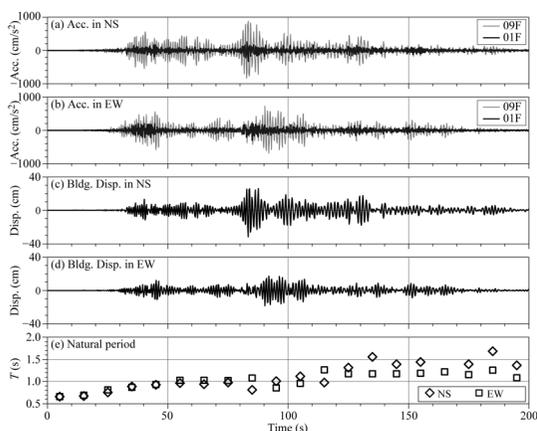


図 11 2011 年東北地方太平洋沖地震・東北大学人間環境系研究棟の強震記録，建物変位，および固有周期の変化

が進行し，建物の変形は 30 cm を超えていることがわかる．1 階から 9 階床までの高さは 29.6 m なので平均的な層間変形率は 1/100 を超えている．この建物は 大破と判定され，2012 年に取り壊された．

この建物では，1978 年宮城県沖地震で，当時設置されていた SMAC-M 型強震計が 9 階で 1G (980 gal) を超える記録を採取したのをはじめ，長きにわたって強震観測を行ってきた．この間に幾度も大きな地震動を経験し，耐震補強もされている [7]．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であろう．

5.3 変化する建物の動特性

2011 年東北地方太平洋沖地震とその余震，誘発地震では，膨大な数の強震記録を蓄積することができた．さまざまな建物のさまざまな振幅の強震記録が利用可能となった．また，これまでに強震記録が蓄積されてきた建物も，大振幅の強震記録が加わることによって，分析の幅が広がった．この結果，建物の地震時応答に関する研究が盛んとなった．

建築研究所の防災研究センター棟（新館と称する）を例に，振動特性が，経年や振幅によって変化する様子を見てみる．この建物では 1998 年の竣工時から現在まで，建物内や周辺地盤上に高密度にセンサーを配置した観測を行っている．図 12 は，新館の 1 次固有周期と減衰定数の経年変化を示している．上段が固有周期，下段が減衰定数を表し，●と△はそれぞれ南北方向と東西方向に対応する．竣工直後には 0.5 秒強であった固有周期は，その後徐々に延びていき，2006 年には 0.7 秒ほどになっている．その後しばらくは固有周期の伸びは収まったように見えるが，2011 年東北地

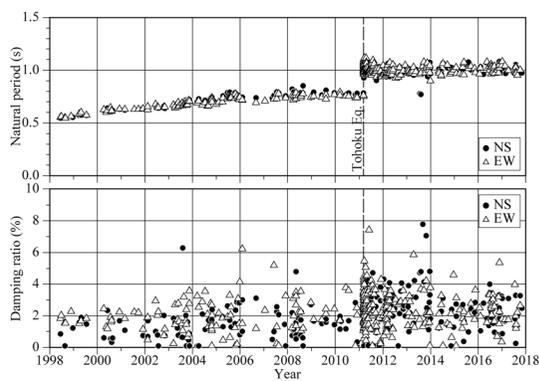


図 12 建築研究所新館の基本固有周期と減衰定数の経年変化

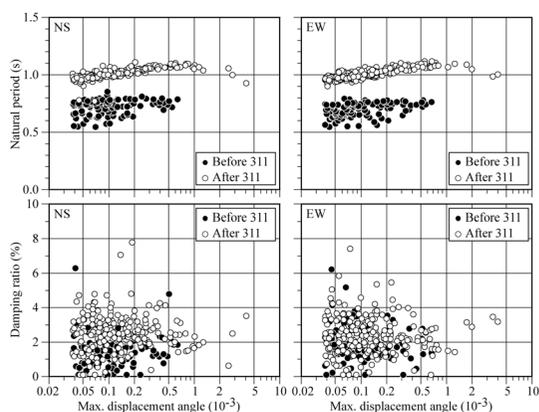


図 13 建築研究所新館の最大変形角と固有周期及び減衰定数の関係

方太平洋沖地震（灰色の破線のととき）を受けて固有周期が 1 秒前後に延びてそのまま現在に至っている．減衰定数に関しては，ばらつきが大きく，経年による傾向は見いだしにくい．

次に，振動特性の振幅依存性を見てみる．応答振幅を表す値として，最大変形角（建物の最大水平変形を 1 階から測定点までの高さで割った値）を採用する．最大変形角と，固有周期及び減衰定数の関係を図 13 に示す．上段が固有周期，下段が減衰定数で，それぞれ左が南北方向，右が東西方向を表す．また，記号は東北地方太平洋沖地震前の地震記録から得られた値を●で，以降の地震記録から得られた値を○で示している．固有周期を見ると，最大変形角が大きくなると固有周期が長くなる傾向が明瞭に認められる．東北地方太平洋沖地震の前後いずれでも同様の傾向となっているが，東北地方太平洋沖地震の前の値の方がばらつく．これは，図 12 に表れた経年変化の影響であろう．

近年，同様の研究はさまざまな規模や構造の建物に

ついて行われており、竣工後 10 年程度の間の固有周期の延びや、振幅が増大すると固有周期が延びる振幅依存性は共通の認識となっていると言える。今後このような知見をどのように耐震安全性の評価に繋げていくかが課題となっている。

6. おわりに

ここで見てきたように、強震観測は地震工学や耐震工学の発展に少なからぬ貢献をしてきた。いったん大地震が発生すれば、何が起きたかを教えてくれるのは強震記録である。地震防災分野での強震観測の重要性は揺るぎない。

一方で、社会的認知度は高いとは言えず、安定した強震観測網の維持とさらなる発展には課題も少くない。この課題の解決のため、たとえば、近年脚光を浴びている構造ヘルスマニタリング技術との融合や、新しい計測技術や通信技術の応用に取り組んでいる。また強震記録のオープン化や関連情報の発信も積極的に行っている [8]。

参考文献

- [1] 高橋龍太郎, “SMAC 型強震計,” 地震 第 2 輯, **6**, pp. 117–121, 1953.
- [2] 中川恭次, “強震計の試作について,” 建築技術, **7**, pp. 12–13, 1951.
- [3] 田中貞二, “日本における強震計の開発と初期の強震観測,” ORI 研究報告94-02, 大崎総合研究所, 1994.
- [4] K. Kudo, T. Uetake and T. Kanno, “Re-evaluation of nonlinear site response during the 1964 Niigata earthquake using the strong motion records at Kawagishicho, Niigata city,” In *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering (12WCEE)*, Paper No. 0969, 2000.
- [5] 坂上実, “釧路市における共同強震動観測,” 東京大学地震研究所技術報告集, **1**, pp. 30–49, 1996.
- [6] 鹿嶋俊英, 小山信, 大川出, “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,” 建築研究報告 135 号, 独立行政法人建築研究所, 2012.
- [7] M. Motosaka, T. Tsamba, K. Yoshida and K. Mitsuji, “Long-term monitoring of amplitude dependent dynamic characteristics of a damaged building during the 2011 Tohoku earthquake,” *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, **15**(3), pp. 1–16, 2015.
- [8] BRI Strong Motion Observation, <http://smo.kenken.go.jp/> (2018 年 6 月 29 日閲覧)