

# これからの強震観測

小阪宏之

戸田建設(株)技術開発センター、研究員

## 1. はじめに

兵庫県南部地震を契機として、防災科学技術研究所の K-NET[1]を始めとする地盤系の強震観測網は急速に展開し、今や全国津々浦々どこで地震が発生しても、オンラインですぐにデジタルデータを手に入れる事が出来るようになった。ローカルな地盤特性の違いによる振動特性への影響等の課題は残されてはいるが、大局的に特性を捉えるという点では十分な密度で観測がなされていると言える。一方、建物系の強震観測は観測目的が多岐にわたる事や観測対象の所有者や管理者の意向といった社会的な要因が絡む事から、全国で統一的な公開観測網は建築研究所の観測網[2]が唯一であり、その数も地盤系の強震観測網と比して非常に数少ない物となっている。耐震工学を考える上で、震源の破壊過程から構造物の破壊による被害に至るまで一体で考えられるべきであり、その点において建物系の観測網の進展はこれからの強震観測を考える上で緊結の課題であると言える。

強震観測は常時稼働していなければならないにもかかわらず、機能を発揮するのは稀であるという特殊な性質を持っているため、その意義は一般には理解されにくい。ユーザの感覚としては、常時動いているものならともかく（実際は常時動いているのであるが）、地震発生時にしか機能しないものにコストを掛けるには抵抗があるだろう。建物系の強震観測を行う場合、従来型の強震観測を行おうとすると設置費用だけで数十万~数百万円、高密度観測を行うとすれば一千万円に上る事もある。長期観測を続ける場合は、当然ながら維持管理にもそれに匹敵するコストと人的リソースが必要であり、普及を阻害する要因である事に疑いの余地はない。強震観測においてコストは切り離す事が出来ない問題である。

これまで、建物系の強震観測は設置及び維持管理にかけられる人的リソースやコストが比較的潤沢である免制震、超高層建物といった特殊建物で行われるのが主流であった。東北地方太平洋沖地震で極めて広範囲で観測記録が得られた事も追い風となり、これらの特殊建物については地震時挙動解明に向けた取り組みが進められてきている[例えば 3,4]。一方で、観測対象建物位置は都市圏に偏っており、大多数を占める「普通」の建物では観測が十分とは言えない[5]。中低層建物については静的な耐震設計しか行われないケースがほとんどであり、強震観測の目的が設計へのフィードバックであるとするならば、観測記録が必要とされてこなかった背景もあるが、社会防衛的な観点からミクロなスケールで被害や地震時の挙動を把握するにはこれらの一般の建物でも観測データを蓄積する必要がある。

通常、強震観測で用いられているのは「サーボ型」と呼ばれる形式のセンサを使用したシステムが主流であるが、近年になってモニタリングの普及が追い風となり、主に建物を対象として、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)センサを利用したローコストシステムが多数提案され、実際の導入も進んでいる[例えば 6,7]。それに伴い、コストの問題でこれまで

参入が出来なかった機関や、MEMS の扱いを得意とする IT 技術者や半導体メーカといったこれまで強震観測にあまり関わってこなかった業態の新規参入も著しく、これまで地震動や構造物の専門家が担ってきた強震観測の転換期が訪れている。これらの安価なシステムと新しい知見を持った技術者の参入はこれまでに構築が出来なかったマイクロな領域までを網羅する観測網の展開を可能とする事が期待される。

本稿では、強震観測における性能検証と実観測記録から MEMS 加速度センサで何が出来るかを示し、最後に MEMS 加速度センサを用いた現状の観測技術の進展とそれによって可能となるであろう強震観測の今後の展望について議論する。

## 2. ローコスト MEMS 加速度センサの性能検証

一般に MEMS 加速度センサの特性として、自己ノイズが卓越する事と長周期域の計測に難があるという事が言われている。例え安価であっても地震が発生した際に全く使い物にならなかったという事では話にならない。ここでは従来型の加速度センサとの比較実験を通して、MEMS 加速度センサの性能について考察する。

MEMS センサが従来型と比して安価と言われる理由としては、大量生産によるスケール効果が寄与する所が大きい。強震観測目的に特化して低ノイズに特化した一点物として制作してしまうと、数が出ない限り安価にならない。実際、強震観測に特化した MEMS 加速度計では既に微動レベルでの測定が可能であるものも存在するが[例えば 8,9]、価格帯としては二十万円程度とそれなりに高価である。ここでは、より大量普及を追求してそれよりも更に安価な価格帯のローコスト MEMS センサを対象とする。なお、MEMS 加速度センサには静電容量式、 piezo 抵抗式、熱感知式等があるが、ここで検証を行ったセンサは全て最も普及している静電容量式のセンサである。

### 2.1 弱震動計測におけるローコスト MEMS 加速度センサの性能

ローコスト MEMS 加速度センサが強震動時に従来型センサとある程度遜色なく加速度記録を計測出来るという事はこれまでも提示されているが[例えば 10,11]、中程度の弱震動においてどの程度効果を発揮するかについても把握しておく必要がある。建物が強震動を受けた際には、それ以前に得られている微動記録や弱震時の記録との比較を通して初めて振動特性の変化を把握する事が出来るからである。

筆者らは複数のローコスト MEMS 加速度センサとサーボ型加速度センサの加振比較実験を行い、その特性の違いについて検証を行った。ここで比較を行ったローコスト MEMS 加速度センサはデバイスとして販売されている物はほとんどの物が数万円、センサチップとして販売されている物は数千円のオーダーで購入できる物で、本来の用途についても自動車制御からゲーミング用まで様々である。図 1 に震度相当値で 3 程度の実地震を模擬したケース、図 2 に正弦波加振を行ったケースのサーボ型加速度センサ及びローコスト MEMS 加速度センサの比時刻歴波形及びフーリエ振幅スペクトル、サーボ型の出力に対するローコスト MEMS センサのコヒーレンスを示す。

図 1 より震度相当値で 3 程度の地震については、主要動部においてサーボ型と同程度の計測が可能である事が分かる。一見すると、長周期域と短周期域で適切に計測が行えていないように思われるが、図 2 よりスペクトルの谷にあたる領域については周期帯に関係なく実効振幅が自己ノイズを下回っている事が分かる。つまりローコスト MEMS 加速度センサの特性として、強震観測に必要な周波数帯域においては一定の大きさの自己ノイズが存在

する事が分かる。また、振幅スペクトルで自己ノイズの閾値を下回る場合については位相特性についても従来型加速度計と異なる傾向となる。詳細については文献[12]を参照されたい。

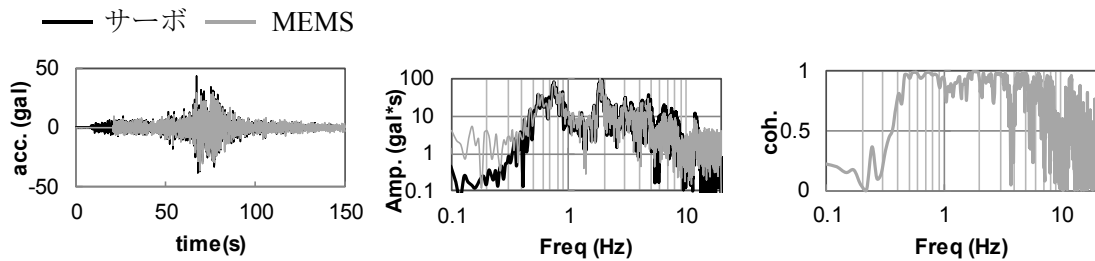


図 1 弱震動加振時のサーボ型加速度センサとローコスト MEMS 加速度センサの比較[12]

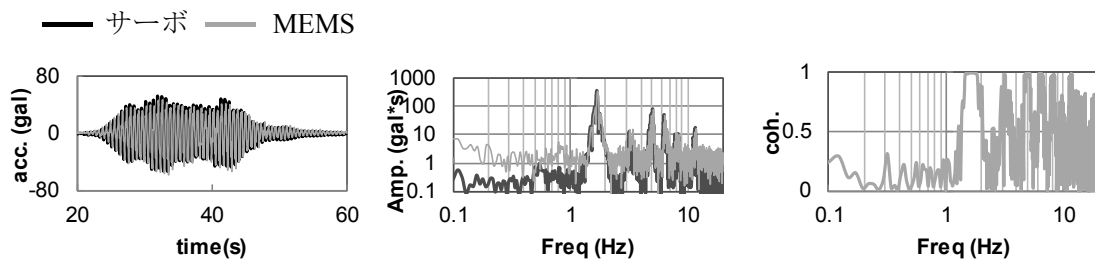


図 2 正弦波加振時のサーボ型加速度センサとローコスト MEMS 加速度センサの比較[12]

## 2.1 長周期地震動計測におけるローコスト MEMS 加速度センサの性能

長周期域の性能については、通常小型の MEMS センサでは固有周波数を数 kHz に取る事から、バネマス原理を鑑みるに基本的には地震計の特性として必要とされる DC~数十 Hz にかけてはフラットであるはずである。図 3 は傾斜させたテーブル上を回転させる事で重力加速度を利用して疑似的に時刻歴長周期大加速度入力を再現し、サーボ型加速度計とローコスト MEMS センサの振動性状の比較を行ったものである。短周期の自己ノイズが載っているのは見て取れるが、長周期域については入力が十分に大きければ加速度記録を観測する事が可能である事が分かる[13]。

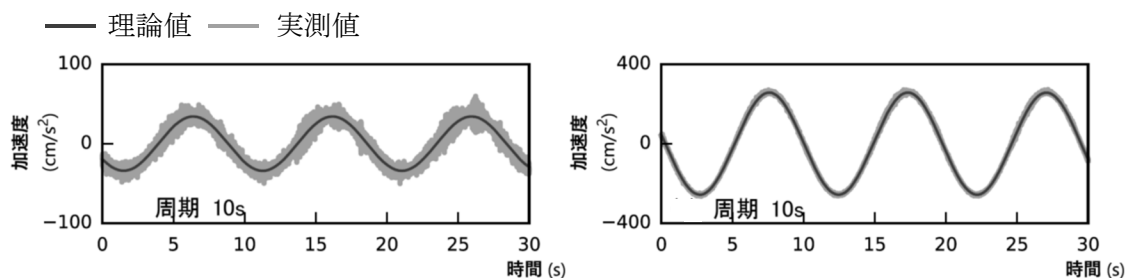


図 3 長周期域の大加速度入力時のサーボ型加速度センサ及びローコスト MEMS センサの比較[13]

### 3. ローコスト MEMS 加速度計による建物強震観測事例

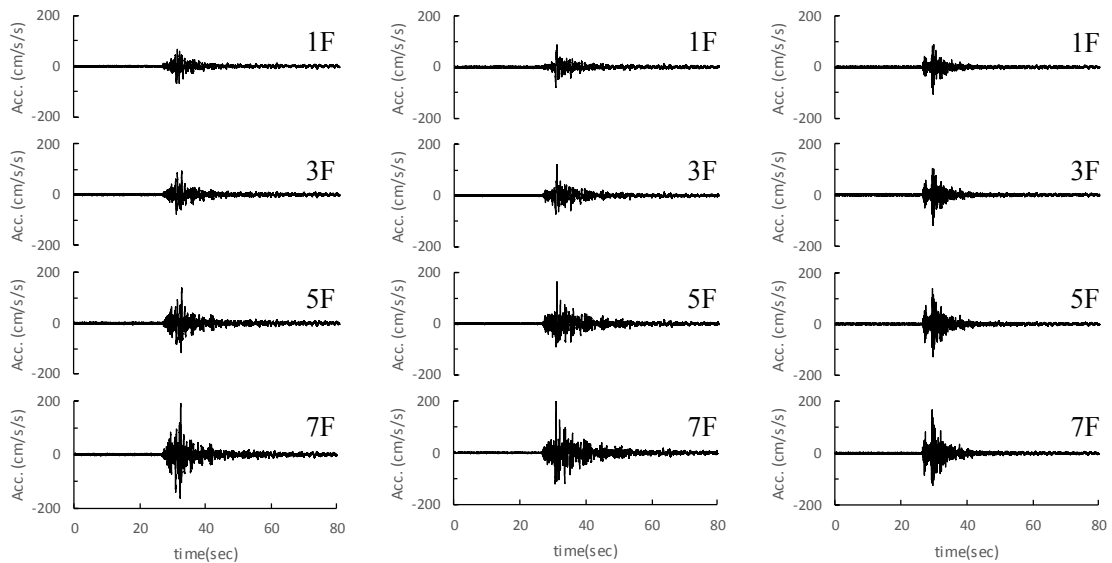
実験的な環境では震度相当値で 3 程度であれば弱震動でも主要動部は捉えられる事、長周期域でも入力が大きければ十分に計測が行える事は既に示した通りだが、実際の建物上での強震観測に適用した際にその性能に問題がないか、観測記録から何が分かるかを確認する必要がある。本年度には 6 月 18 日には大阪府北部の地震(Mj6.1)が、9 月 6 日には北海道胆振東部地震(Mj6.7)と 2 つの被害地震が発生した。ここでは一例として、ローコスト MEMS 加速度センサを使用したシステム[14]において得られた建物での強震観測記録について簡単に紹介する。

#### 3.1 2018 年大阪府北部の地震の観測記録

2018 年大阪府北部の地震における大阪市内の建物で得られた強震観測記録について報告する。当該建物は大阪市西区に立地する 8 階建て RC 造建物であり、竣工は 1975 年である。センサは 1 階、3 階、5 階、7 階に設置されており、2016 年 2 月より観測を行っている。写真 1 に建物外観を示す。図 4 に建物内で得られた加速度波形を、図 5 に各階と 1 階のフーリエスペクトル比を示す。



写真 1 観測建物外観



(a)建物短辺方向

(b)建物長辺方向

(c)上下方向

図 4 大阪市内の建物で得られた加速度波形

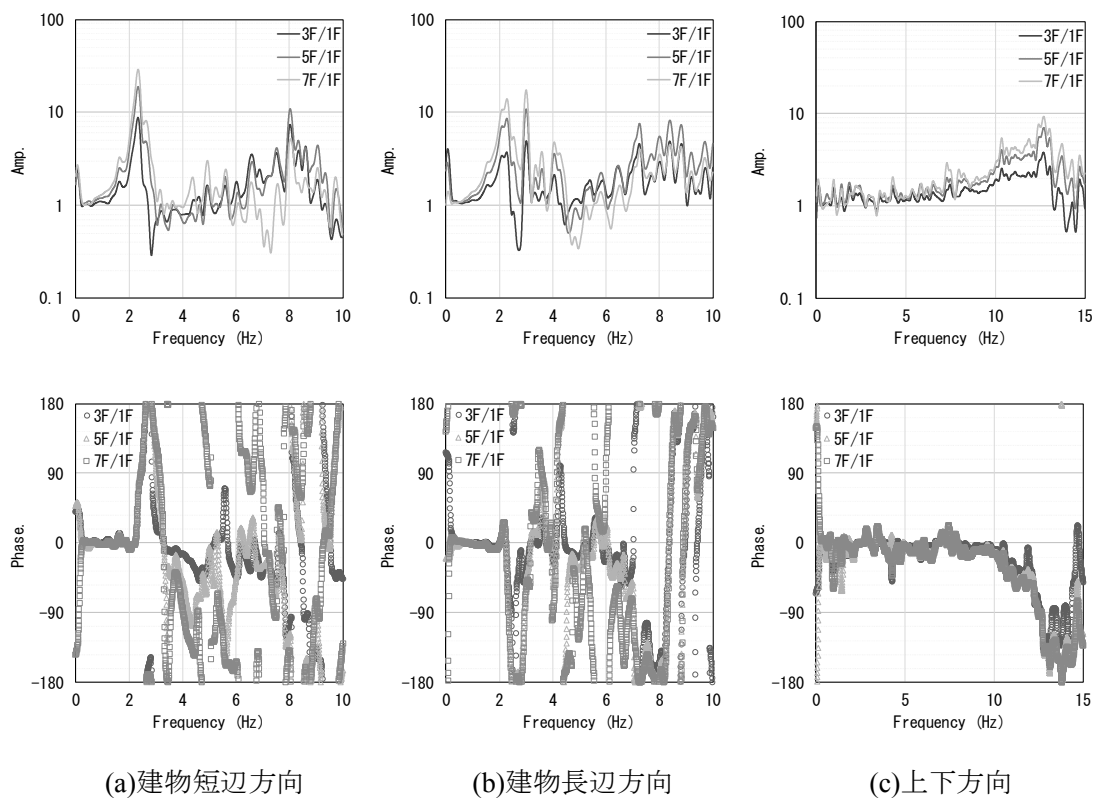


図5 各階と1階のフーリエスペクトル比

上階に行くにつれて1次固有周波数における振幅が大きくなり、位相についてもそれまではよく合っており、1次モードが卓越した挙動をした事が分かる。この規模の強震動であれば、実建物においても1次モードまで十分に計測が可能である事が確認できる。

### 3.2 2018年北海道胆振東部地震における建物観測記録

北海道胆振東部地震発生時に札幌市内の建物で得られた記録について紹介する。当該建物は札幌市中央区に位置する1968年竣工の4階建てRC造建物であり、3階部分でセットバックしている。センサは1階と4階に設置されており、2016年3月より観測を行っている。図6に得られた加速度波形を示す。

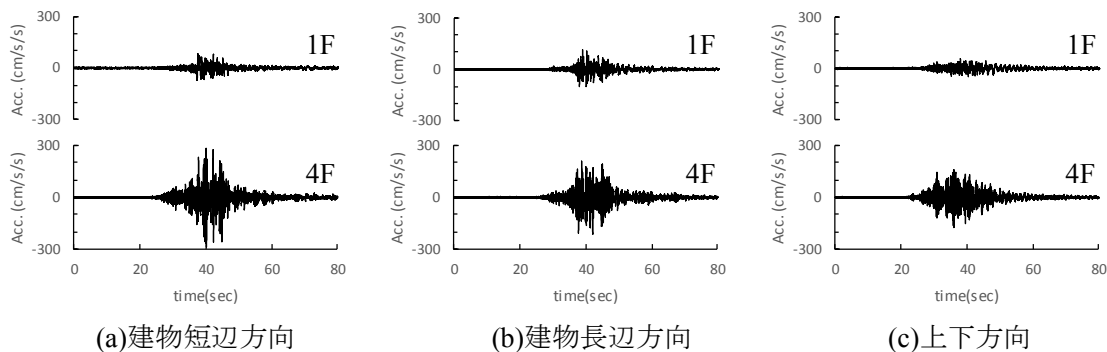


図6 札幌市内の建物で得られた加速度波形

本観測点では無停電電源装置を併設していたが、地震に伴うブラックアウトにより、9月

6日3時25分48秒にネットワーク切断が発生し、9月7日15時40分9秒に復旧するまで観測は停止してしまっただけでなく、余震記録を含めて複数の観測記録が得られている。図7は観測記録の主要動部を用いてMOESP法[15]を用いて同定した1次固有周波数の変動である。本震を受けて固有周波数が低下し、やや回復している傾向が見える。

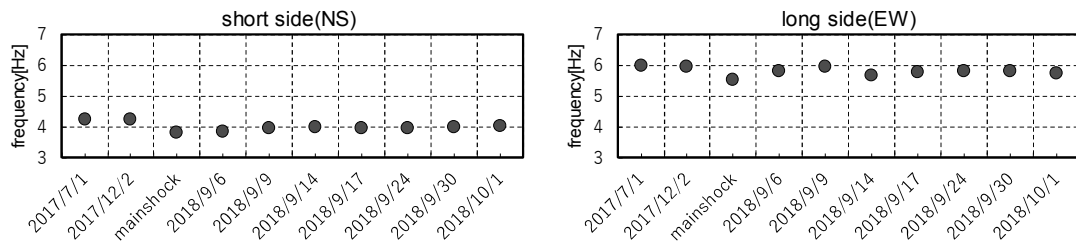


図7 札幌市内の建物の固有周波数の変化

本震記録中の1階センサと4階センサのランニングスペクトル比を図8に示す。主要動部で固有周波数が低下している事が分かったと共に、建物長辺方向の結果に注目すると、1次周波数近傍で異なる周波数帯域に卓越がある事がうかがえる。これはねじれ特性であると推察されるが、観測記録が得られた事によって初めて得られた知見であると言える。また、100秒以降については、建物長辺方向、上下方向記録でピークが明瞭に見えなくなっているが、前述の自己ノイズに埋もれてしまっていると推察される。

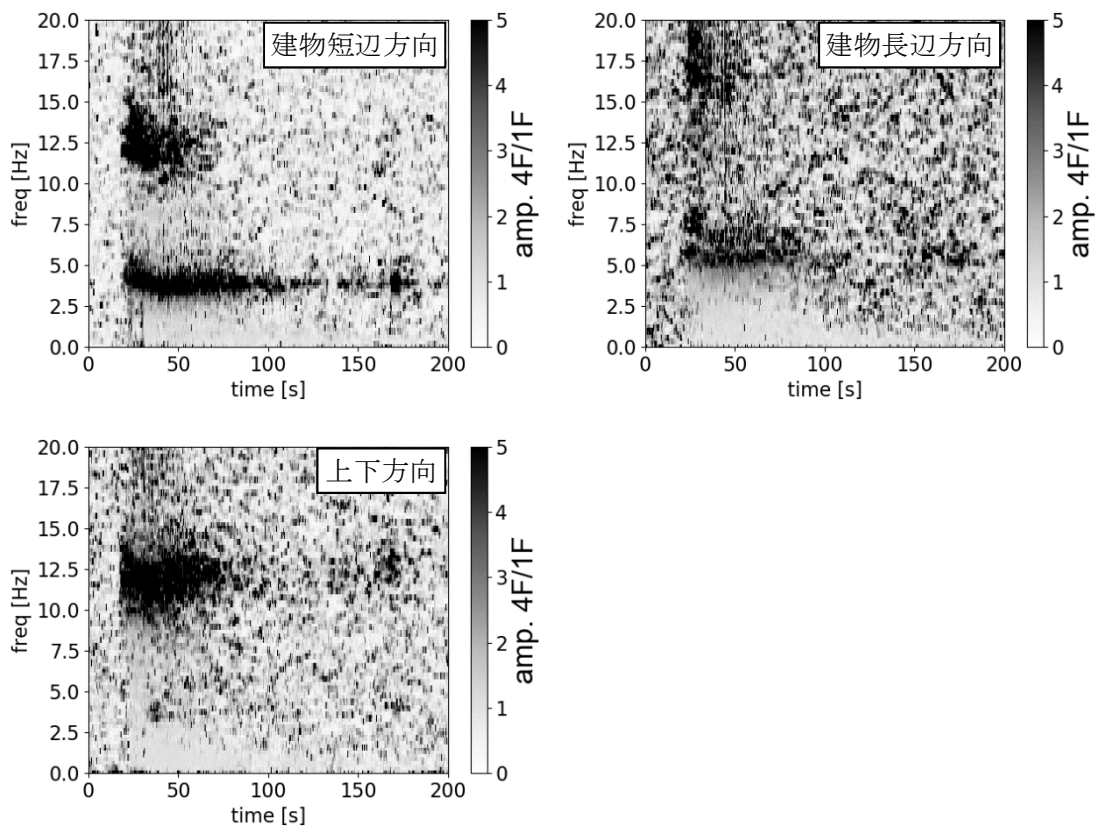


図8 胆振東部地震本震時における札幌市内の建物内観測記録のランニングスペクトル比

なお、ここで紹介した札幌市内の建物における北海道胆振東部地震本震観測記録については web 上で加速度時刻歴波形を公開している[16]。強震動観測時におけるローコスト MEMS 加速度センサの性能がどのようなものであるかを実際に確かめて頂ければと思う。

#### 4. 更なるローコスト化と新しい強震観測

大量生産によるスケール効果が MEMS センサが安価である所以である事は既に述べたとおりだが、実際我々の生活レベルでは既に至る所で MEMS センサが使われており、多用途で大量生産されている物を転用するというのも更なるローコスト化に寄与する所である。例えば全世界での利用台数は 40 億に達すると推計されているスマートデバイスにはそのほとんどに MEMS 加速度センサが組み込まれており、無線通信、GPS 等の強震観測に必要である機能を有している。これらをセンサネットワークとして強震観測に応用する取り組みも様々な機関で行われている[例えば 17,18]。

長期的な強震観測を行う上で、最も障害となるのが、記録の回収や、維持管理に関する人的コストである。従ってなるべく現地に行く回数を減らしてやる事はローコスト化に直結する。近年ではストレージも大容量化したため、ストレージ内に記録を収録しても頻繁に記録の回収に行く必要はなくなったが、インターネットを利用した遠隔による記録の回収がいかに有効であるかはここで改めて言及するまでもない。データサーバを構築するとその維持管理には膨大なコストが掛かる。そこでパブリッククラウドサービスを利用する試みも出てきている[例えば 14,18]。強震観測はいつ発生するか分からない地震に備えて常時稼働しなくてはならないというシステムの性質上、メンテナンスが必須であるが、パブリッククラウドサービスを用いた管理ではシステムのアップデートやセンサの死活監視が容易である事や、観測点数の増加等に伴うストレージの増設が用意に行えることも挙げられる。

給電方式についても、従来型のセンサに比して省電力である事を生かして、ソーラーパネルを用いて常時計測するシステム[19]や、電池式でも数年単位で連続観測を行えるシステム[20]も登場している。電池式、充電式であれば配線が不要となり、導入時のコストダウンに大きく寄与するのはもちろん、臨時観測を行う場合や地震による停電等で商用電源が使えない場合には威力を発揮する。こうした無線技術は、相互作用系、地盤建物系の観測といった多点配置を必要とする観測の普及を可能とする事が期待される。

#### 5. まとめ

本稿では強震観測の普及を阻害する主な要因となっているコストに焦点を当て、ローコスト MEMS 加速度センサの強震観測における性能とそれを用いた新しい強震観測について示した。本日の話題提供でも挙げられている通り、既にモニタリングを対象とした観測では MEMS センサを使用したローコストシステムが主力となっており、ユーザのメリットとコストのバランス、前章で述べたような IoT 技術との親和性の高さ、維持管理やリプレースの手軽さ等から、今後の強震観測の主流となっていく事は間違いないだろう。

一方で、これまで見てきたように、ローコスト MEMS センサには常にその自己ノイズという性質が付きまとうため、これまで行われてきた強震観測に直ちに取って代わるものではない。例えば、現在の耐震設計の基準とされている層間変形角の算出等を行う場合は工夫や割り切りが必要である。また、微動や震度階で 0 や 1 に相当する微小地震を観測することは出来ないため、設置数が増加したとしても有意な観測記録数が大幅に増加するという事にもならない。しかし近年頻発している内陸地殻内地震に対して、被害地震発生時に適切

な強震観測記録がない事によって分析が困難となっている例を考えるに、広く網羅的に地震計を配置する事には意義があると言える。いわば「大きな地震が発生した際の保険」としての導入であるが、高性能なセンサを使った詳細解析を目的とする基幹観測とこのような大量普及を目指した廉価なシステムの使い分けを行う事がこれからの強震観測の鍵である。

## 参考文献

- [1] 藤原広行, 功刀卓, 安達繁樹, 青井真, 森川博之: 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, 第 7 巻, 第 2 号 (特集号), pp.2-16, 2007
- [2] 鹿嶋俊英: 建築研究所の強震観測の 60 年, 建築研究所講演会, 2017
- [3] 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, 建築研究資料, No.135, 建築研究所, 2012
- [4] 永野正行, 肥田剛典, 田沼毅彦, 中村充, 井川望, 保井美敏, 境茂樹, 森下真行, 北堀隆司, 上林宏敏: 強震下の超高層集合住宅の挙動説明と今後の被害提言に向けた取り組み, 日本地震工学会論文集, 第 16 巻, 第 5 号 (特集号), 2016
- [5] 飛田潤, 鹿嶋俊英, 中村充, 植竹富一, 山村一繁, 栗田勝実, 神原浩: 国内の強震観測建物台帳の作成, 日本建築学会技術報告集, 第 20 巻, 第 46 号, pp.901-904, 2014 年 10 月
- [6] 清水善久, 小金丸健一, 中山渉, 山崎文雄: 超高密度地震防災システム (SUPREME) の開発, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1285-1288, 2001
- [7] 山本健史, 保井美敏, 成田修英, 小阪宏之: 振動モニタリングに基づく地震後の健全性評価とその情報提供に関する技術, JACIC 情報 118 号「自然災害と ICT」, 2018
- [8] 坂上智, 村上敬三, 北川慎治: MEMS 応用感振センサを用いた構造ヘルスマモニタリングシステム, 富士電機技報, Vol.87, No.1, pp.63-67, 2014
- [9] 市川真太郎, 松崎政彦, 田村博規, 富岡昭浩: 構造ヘルスマモニタリング向け加速度計 JA-70SA の開発, 航空電子技報, No.37, pp.9-14, 2015
- [10] 三浦篤, 仲野健一, 境茂樹: スマートデバイスに搭載された MEMS センサの地震計としての性能把握試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.209-210, 2018
- [11] 森田高市, 長谷川隆: 鉄骨部分骨組の振動台実験に基づく梁端部の損傷検知手法に関する研究 (その 3) 試験体の固有振動数の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.883-884, 2017
- [12] 小阪宏之, 鹿嶋俊英: 安価な MEMS 加速度センサの振幅特性及び位相特性の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.211-212, 2018
- [13] 成田修英, 保井美敏, 山本健史, 小阪宏之: 安価な MEMS 加速度計の低周波数領域における周波数応答特性検証とその方法, 日本地震工学会大会 2017, P3-25, 2017
- [14] 矢吹慎悟, 保井美敏, 成田修英, 山本健史, 石田琢志, 渡壁守正: 安価なシングルボードコンピュータと MEMS 加速度計を用いた地震情報配信システムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.5-6, 2016
- [15] Verhaegen, M. and P. Dewilde: Subspace model identification Part 1. The output-error state-space model identification class of algorithms, International Journal of Control, Vol. 56, No. 5, pp. 1187-1210, 1992
- [16] 戸田建設: 平成 30 年北海道胆振東部地震の観測データを公開, 戸田建設ニュースリリース, <http://www.toda.co.jp/news/2018/20181016.html>
- [17] Kong Q., M. A. Richard, D. K. Monica, H. H. Thomas, and B. Julian: Structural Health



Monitoring of Buildings Using Smartphone Sensors, Seismological Research Letters, Vol. 89, Number 2A, pp.592-602, 2018

- [18] 藤原広行, 東宏樹, 内藤昌平, 先名重樹, 中村洋光, はお憲生, 吉田稔, 結城昇, 平山義治: センサークラウド技術を用いた建物の地震応答情報共有システム, 日本地震工学会論文集, 第13巻, 第5号, pp.44-61, 2013
- [19] 富岡昭浩, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介: 軍艦島モニタリングプロジェクト その2 長期振動計測システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.955-956, 2016
- [20] 鈴木誠, 長山智則, 大原壮太郎, 森川博之: 同時送信型フラッシュを利用した構造モニタリング, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J100-B, No. 12, pp.952-960, 2017