実測値に基づく MEMS チップの地盤震動観測への適用性検討

栗田　哲史 [1]

[1]正会員　東電設計株式会社（〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F）
E-mail:kurita@tepsco.co.jp

広域で稠密な地震観測の実現性を確認するために，小型かつ廉価な MEMS チップによる地盤震動観測について検討した．関東地方のサイトにおいて MEMS と従来型地震計を自由地盤上に同時に設置して観測実験を行った． 実験結果より，以下のような知見が得られた．MEMS による観測記録には低周波数側に一定レベルのノイズが混入していることが分かった．PGA と計測震度については，振幅レベルが小さい領域でも両センサー間で殆ど差異は生じないことが分かった．一方，低周波数成分が重要となる PGV や SI 値については，値が小さい場合に MEMS の計測結果が過大評価になることが分かった．時刻歴波形の比較からは，PGA が概ね 20cm/s^2 を下回る場合に，MEMS の観測結果はサーボ型との一致性が低下する可能性がある事が分かった．

Key Words: *MEMS, seismic observation, ground motion, servo type acceleration sensor, field experiment*

1. はじめに

著者は関東地方の地震動特性を把握するために，各種地震計ネットワークによる観測記録を用いて，地盤震動について検討してきている [1)-3)]．これまでの検討結果から，地震動特性が地域特性を有していることが分かってきている．世界的視点に立てば我が国の地震観測網は十分密に設置されていると言える．しかし，実地盤の地質および地形の不均質性に鑑みれば，現状の観測点の設置密度では未だ疎であると言わざるを得ない．一方で，広域かつ稠密に地震計を設置することは，膨大な費用を要することから現実的でない．そこで，廉価な地震計を用いることによって，稠密な地震動観測システムを構築することができれば，この問題は解決可能となる．

MEMS(Micro Electro Mechanical System)チップは，自動車のエアバッグ，携帯電話，ゲーム機等で加速度センサーとして既に実用化されている．地震工学の分野でも，その有用性は認識されており，今後の活用が望まれているところである[例えば4)]．

MEMS を地震計として利用する考え方は既に幾つか行われてきている．小野他 [5)]は MEMS を用いた構造物の地震被害を即時判定する手法を提案している．その結果，通常の地震計よりも精度は劣るものの一次的な被害判定に利用可能としている．齋藤他 [6)]は振動台実験によって MEMS センサーの性能を調べ，1Hz 以下の波形が正確に計測できないと述べている．野田他 [7)]は地震発生後に鉄道の効率的な巡回点検を行うために，MEMS を用いたポータブル地震観測装置を開発した．振動台実験の結果に基づくセンサーの性能として，計測震度 2.5 以上の揺れに対して気象庁検定済みの計測震度計と比較して誤差が±0.1 以下になることを確認している．黒田他 [8)]は構造物被害監視用として，複数個所への設置を念頭に置いた MEMS によるコンパクトな 3 軸加速度計を開発した．検証のために，熊本市内でサーボ型地震計との同時観測を行い，熊本地震の余震記録から周期 1 秒以下の周期帯では両者の加速度応答スペクトルがほぼ同値になることを確認している．以上の通り，既往の研究結果によると MEMS は低周波数側の性能において，従来の地震計と比較して性能が劣ることが分かる．しかし，MEMS を地盤震動計測用に利用することを主目的とした定量的な性能評価が十分に行われているとは言い難い状況である．そこで，MEMS を用いた地盤上での実地震観測を一定期間実施し，収集した観測記録を用いて性能評価を行うことが必要であると考えた．

本研究では，広域に稠密な地震動観測を実現することを目的として，小型かつ廉価な MEMS チップによる地盤震動観測について検討した．実際の自由地盤に MEMS と従来型の地震計を同時に設置し，観測記録の分析から MEMS による地盤震動観測の実現性について評価した．

2. 実証実験の概要

(1) 観測実験方法

観測実験を行った場所は**図-1** に示す那珂川沿いの東茨城台地である．地震観測は 2017 年 10 月から 2018 年 6 月まで実施した．観測実験は，**図-2** の通り 2 種類のセンサーを同じ場所に設置して，1 つの収録装置で記録するシステムによって行った．これにより，得られた 2 種類の観測記録間の差異は純粋にセンサーに起因するものだけとなる．

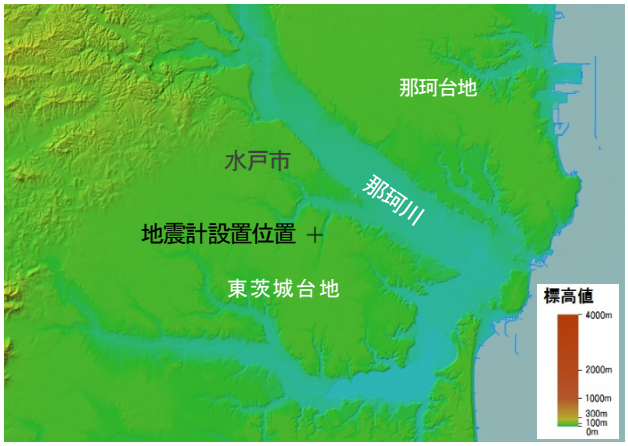


図-1 地震観測地点標高図
（背景地図：国土地理院 地理院地図（電子国土 Web））

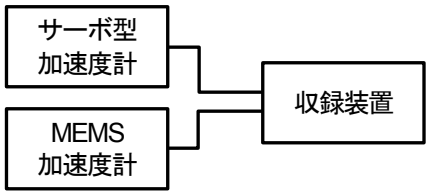


図-2 観測システムの概要

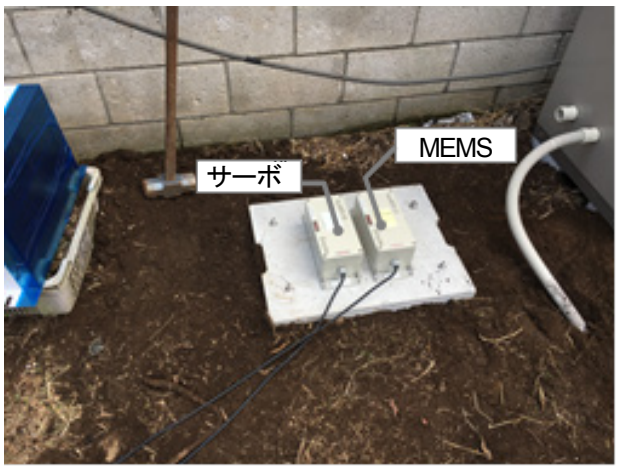


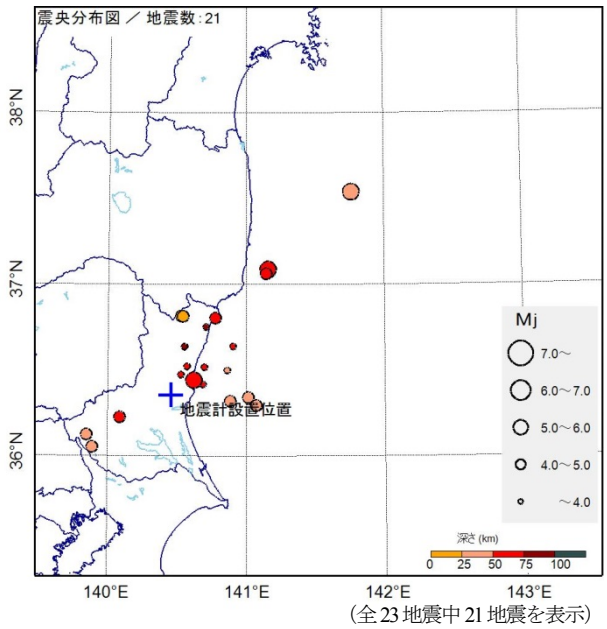
図-3 センサーの設置状況

センサーの設置状況は**図-3** の通りであり，MEMS 加速度計とサーボ型加速度計を同一コンクリート床版に取り付け，自由地盤上に設置した．使用した MEMS チップはアナログ・デバイセズ社製の ADXL-354（フルスケール：±2g）である．このセンサーはアナログ出力であるため，後述のサーボ型地震計で使用しているものと同型の A/D 変換器を用いて出力信号をディジタル化している．一方，サーボ型加速度計は勝島製作所製の AccuSEIS 103（フルスケール：±2000cm/s^2），収録装置も同社製の AccuSEIS Omni である．観測記録のサンプリング周波数は 100Hz で，収録装置内で 30Hz のローパス・フィルター処理を施している．

なお，センサーの設置方位は敷地の形状に合わせた．各成分の正方向は，X を N16° E，Y を E16° S，Z を Up とした．

(2) 観測記録の概要

地震観測は 2017 年 10 月～2018 年 6 月までの約 9 か月間にわたって実施した．期間中に得られた観測記録の地震諸元は**表-1** に示す通りである．全部で 23 地震の観測記録が得られた．**表-1** の地震のうち遠方の 2 地震を除いた 21 地震の震央分布図を**図-4** に示す．また，地震に関する基本パラメータ間の関係を**図-5** に示す．図より，サイト近傍で発生した Mj 3～5 程度の地震が比較的多いことが分かる．しかし，Ml6 以上の地震，深さ 90km 以上の比較的深い地震，震源距離 300km 以上の遠方の地震なども含まれており，標本としては多様な性質を持った地震の記録が得られたと考えられる．



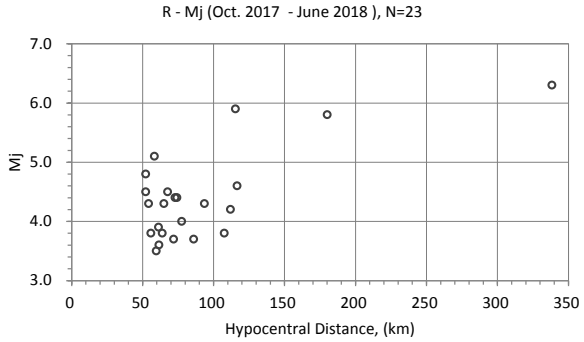
（全 23 地震中 21 地震を表示）

図-4 震央分布図

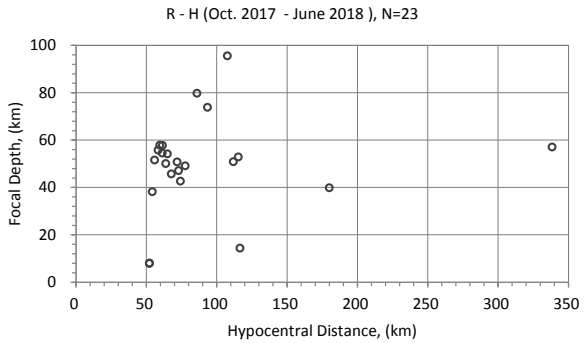
表-1　観測記録の地震諸元

EQ.	Origin Time						Hypocenter					Mj	Region
							Long.		Lat.		Depth		
	year	mn	dy	hr	mi	sec	deg.	min.	deg.	min.	(km)		
01	2017	10	06	16	59	32.9	37	26.1	143	56.9	57.0	6.3	本州東方はるか沖
02	2017	10	06	23	56	40.8	37	05.2	141	09.4	52.8	5.9	福島県東方沖
03	2017	10	15	19	43	09.0	36	31.3	140	34.3	57.7	3.6	茨城県北部
04	2017	10	19	00	08	34.7	36	29.9	140	51.7	50.0	3.8	茨城県東方沖
05	2017	10	19	21	50	29.0	37	03.7	141	08.6	50.8	4.2	福島県東方沖
06	2017	11	02	22	31	06.7	36	48.2	140	46.6	73.8	4.3	茨城県北部
07	2017	11	03	21	38	06.1	36	48.9	140	31.8	8.0	4.8	茨城県北部
08	2017	11	05	16	30	09.0	36	07.4	139	51.0	49.1	4.0	茨城県南西部
09	2017	11	21	09	25	13.7	36	31.0	140	41.8	54.5	3.9	茨城県北部
10	2017	12	02	00	12	30.0	36	03.1	139	53.4	42.6	4.4	茨城県南西部
11	2017	12	06	00	22	10.5	36	48.8	140	32.5	7.9	4.5	茨城県北部
12	2017	12	23	21	54	05.2	36	25.0	140	41.2	51.5	3.8	茨城県北部
13	2018	01	07	18	19	57.1	36	17.6	141	04.3	47.1	4.4	茨城県東方沖
14	2018	01	24	02	32	05.1	36	19.1	140	53.0	38.2	4.3	茨城県東方沖
15	2018	01	31	10	15	23.1	36	20.4	141	00.8	45.7	4.5	茨城県東方沖
16	2018	02	06	22	57	07.3	36	38.3	140	54.2	50.7	3.7	茨城県東方沖
17	2018	02	26	01	28	39.7	37	32.3	141	45.8	39.8	5.8	福島県東方沖
18	2018	02	27	08	08	02.1	36	13.5	140	05.2	54.1	4.3	茨城県南西部
19	2018	03	30	08	17	33.7	36	26.5	140	37.2	55.7	5.1	茨城県北部
20	2018	04	03	21	06	11.4	36	45.1	140	42.5	95.5	3.8	茨城県北部
21	2018	04	07	05	14	07.8	36	28.4	140	31.7	57.8	3.5	茨城県北部
22	2018	06	06	16	22	44.4	36	38.2	140	33.2	79.7	3.7	茨城県北部
23	2018	06	17	15	27	21.9	36	27.4	139	10.3	14.3	4.6	栃木群馬県境

震源情報の出典：気象庁一元化処理震源リスト

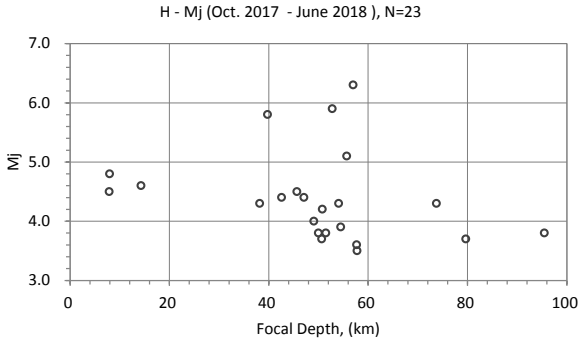


(1) 震源距離とマグニチュードの関係



(2) 震源距離と震源深さの関係

図-5　地震に関する基本パラメータ間の関係図 (1)



(3) 震源深さとマグニチュードの関係

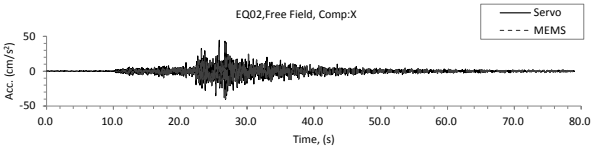
図-5　地震に関する基本パラメータ間の関係図(2)

3.　観測記録の分析

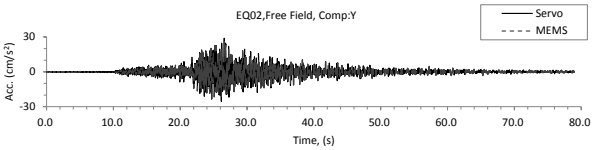
MEMS センサーの性能を理解するために，MEMS で得られた記録とサーボ型地震計の観測記録との比較を行った.

(1)　センサー間の記録比較の基本的検討

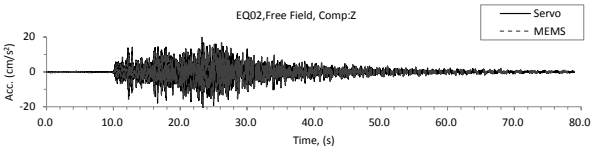
はじめに，基本的事項である時刻歴波形の外形的な比較と時間ずれについて調べた.



(1)X成分

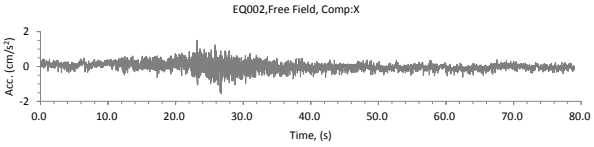


(2)Y成分

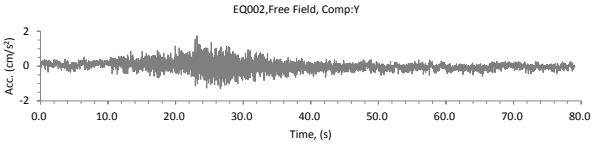


(3)Z成分

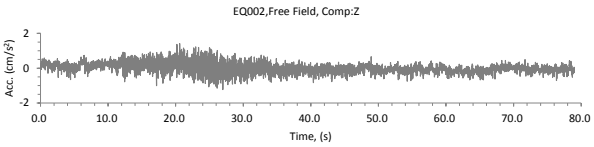
図-6　加速度時刻歴波形の比較（EQ.02）



(1)X成分



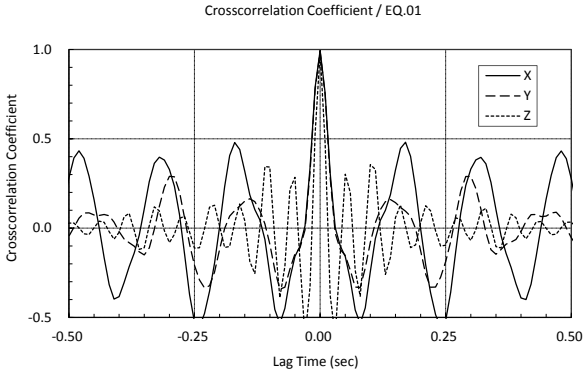
(2)Y成分



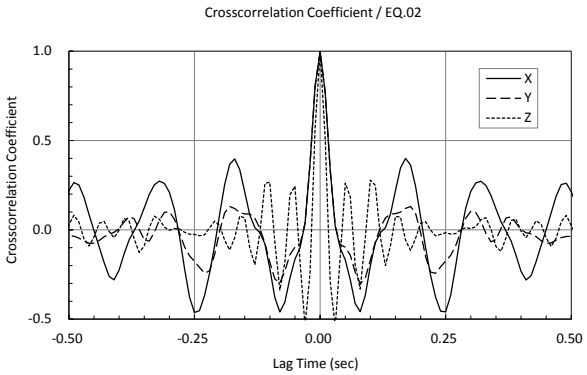
(3)Z成分

図-7　加速度時刻歴波形の差分（EQ.02）

2016年10月6日の福島県東方沖の地震（Mj5.9）記録を例として，時速歴波形の比較を行った．**図-6** の時刻歴波形の比較では，両者の差異を目視で確認することは困難である．そこで，時間領域で両者の差分を**図-7** の通り求めた．図より，最大振幅 20～45cm/s^2 の加速度記録に対して，最大 1.2～1.8cm/s^2 程度の差異が生じていることが分かる．この差異は主要動付近で大きくなり，それ以外の箇所では小さくなる傾向が見られ，振幅に依存したものと言える．



(1)EQ.01



(2)EQ.02

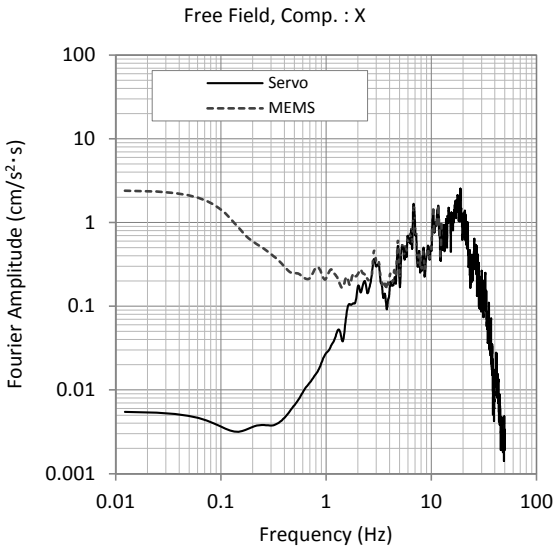
図-8　センサー間の相互相関係数

次に，得られた記録の中で比較的振幅の小さい EQ.01 と振幅が大きい EQ.02 を対象として，成分（X, Y, Z）ごとにセンサー間の相互相関係数を求めた．**図-8** に示す通り，いずれの成分も時間ずれ 0.0 秒でピークを生じていることから，各センサー間に時間ずれは生じていないことが確認された．また，その時の相互相関係数は 0.99 程度であり，ほぼ完全相関に近いと言える．

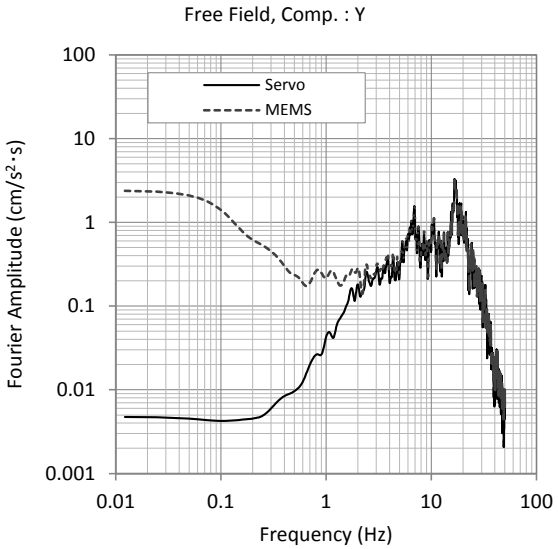
(2)　周波数特性の比較

次に，両センサーで得られた記録の周波数特性について検討を行った．検討方法としては，両記録のフーリエスペクトルについて比較した．

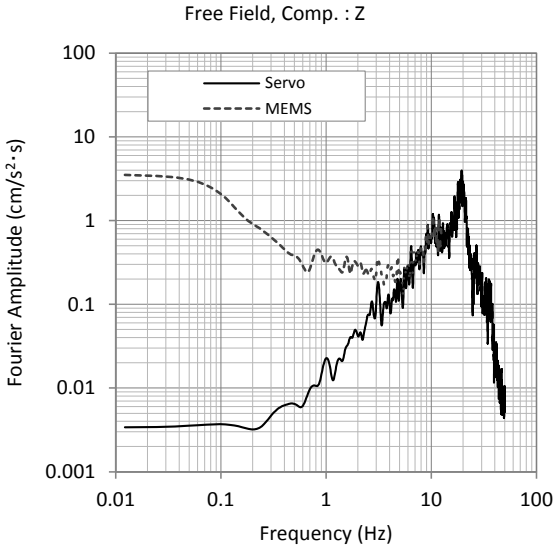
最大加速度 10cm/s^2 程度と比較的振幅の小さい記録（EQ.04）を対象としたフーリエスペクトルは**図-9** に示す通りである．一方，最大加速度 70cm/s^2 以上の振幅の大きい記録（EQ.19）のフーリエスペクトルを**図-10** に示す．ここで，各フーリエスペクトルは 0.2Hz の Parzen window で平滑化処理を施している．両図より，MEMS の記録について，振幅の小さい EQ.04 の記録で低周波数側のノイズが顕著であり，0.1Hz 以下では地震波主要部の信号をも上回っている．



(1)X成分

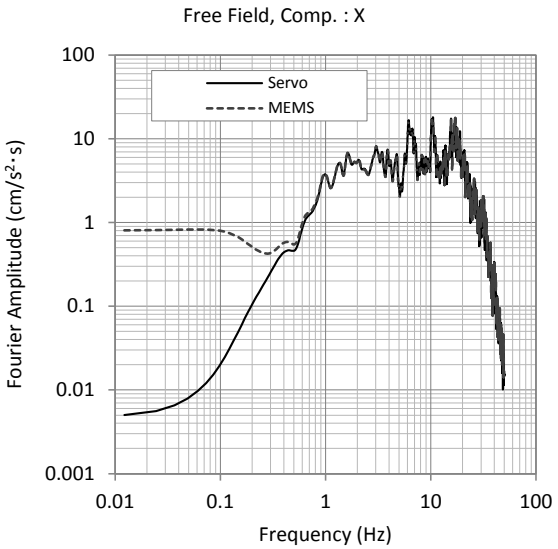


(2)Y成分

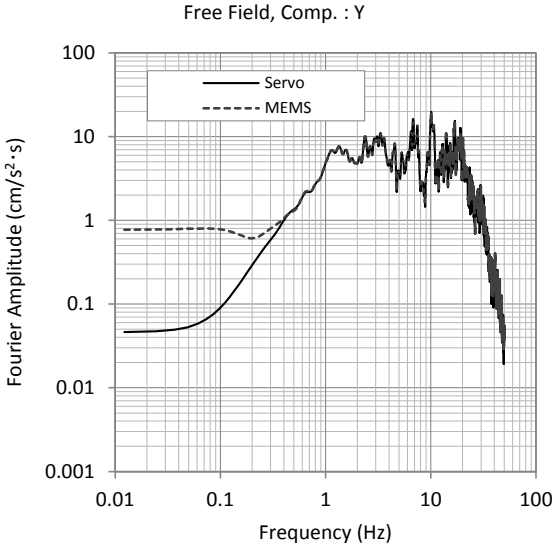


(3)Z成分

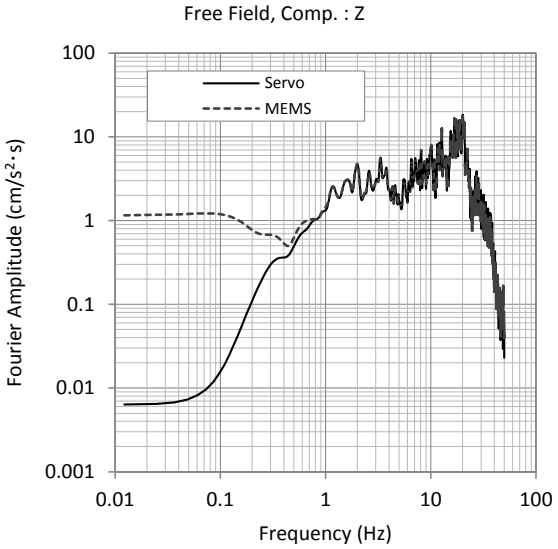
図-9 小振幅記録のフーリエスペクトル比較（EQ.04）



(1)X成分

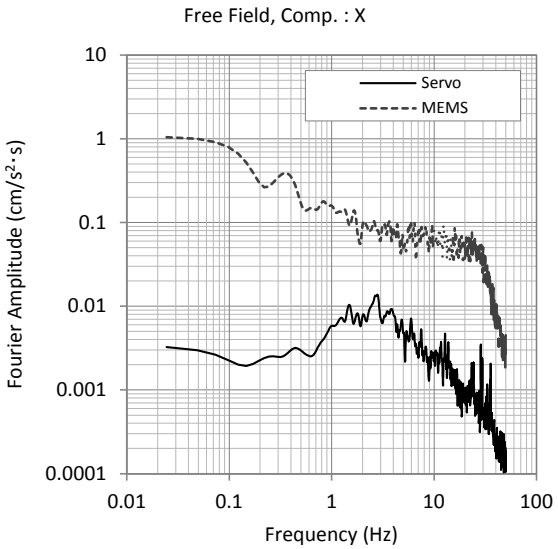


(2)Y成分

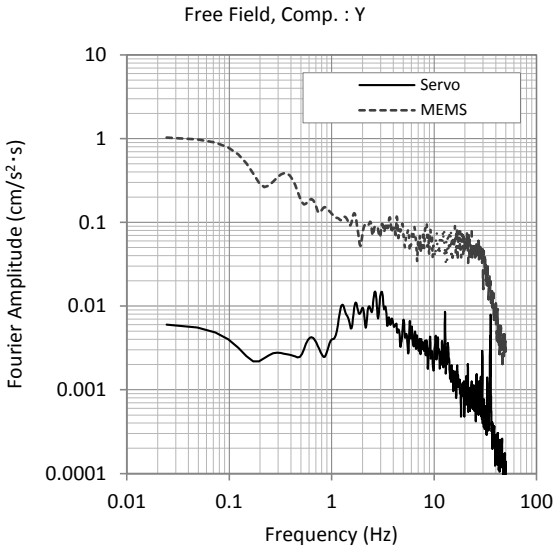


(3)Z成分

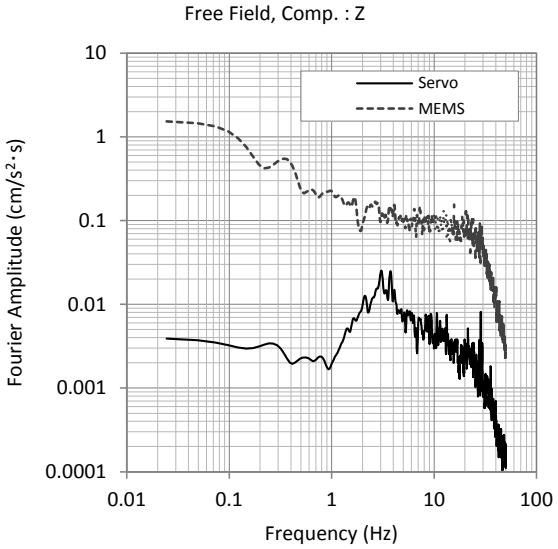
図-10 大振幅記録のフーリエスペクトル比較（EQ.19）



(1)X成分

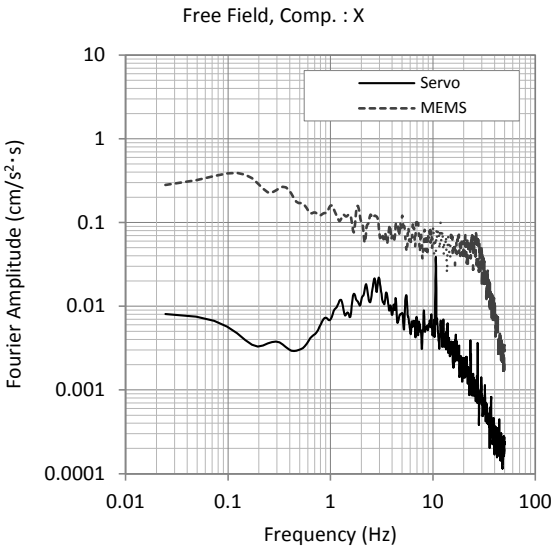


(2)Y成分

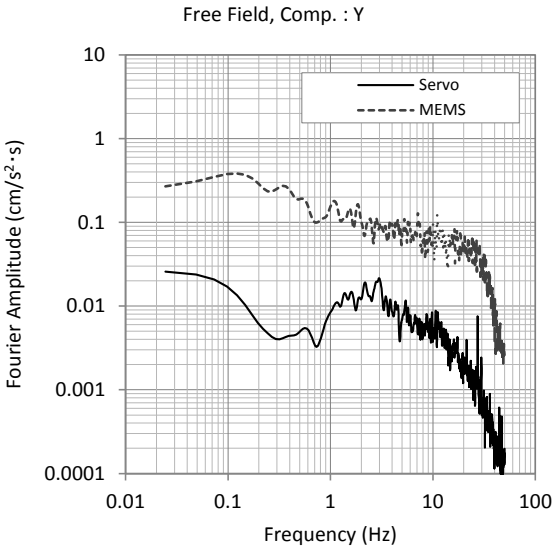


(3)Z成分

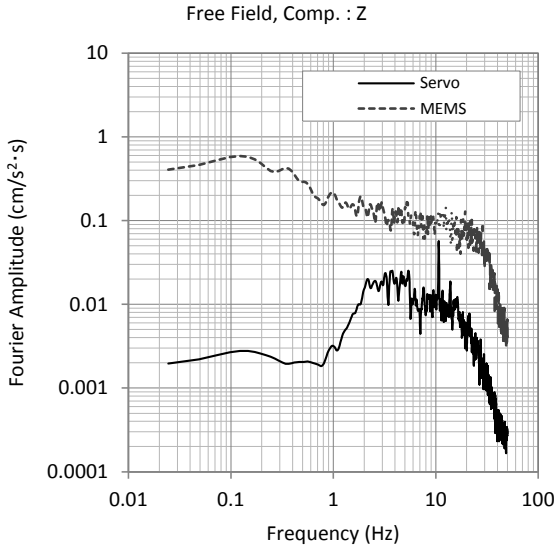
図-11　常時微動のフーリエスペクトル比較（10月01日）



(1)X成分

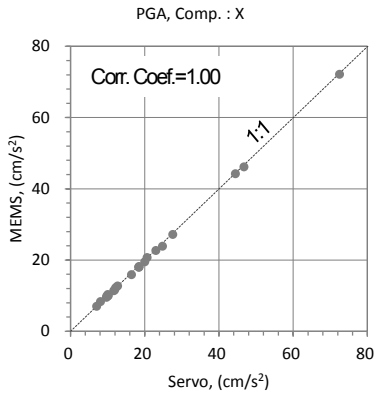


(2)Y成分

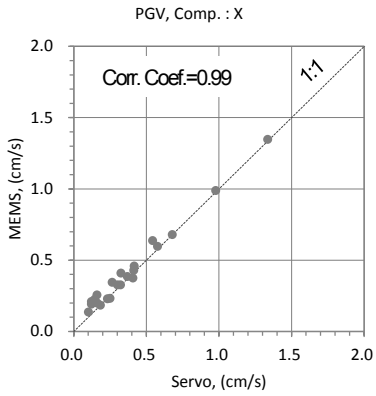


(3)Z成分

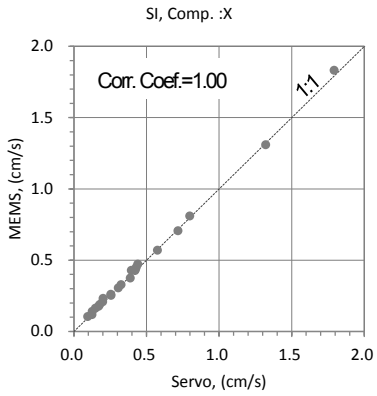
図-12　常時微動のフーリエスペクトル比較（10月02日）



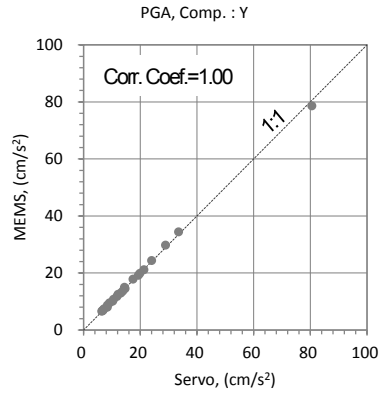
(1) X 成分の PGA



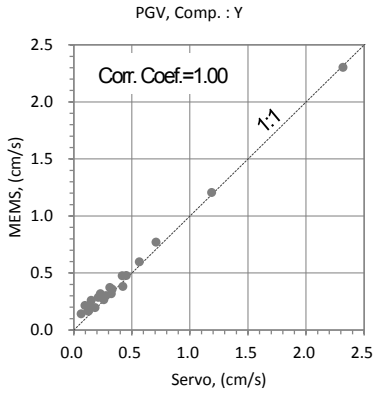
(5) X 成分の PGV



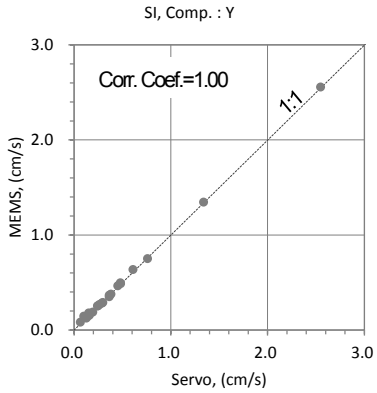
(9) X 成分の SI 値



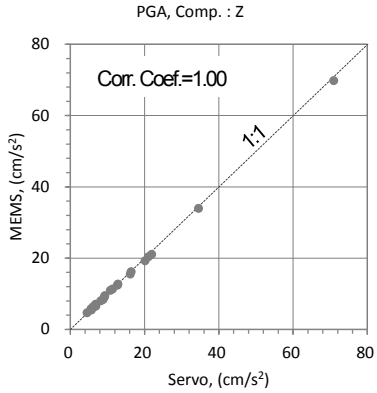
(2) Y 成分の PGA



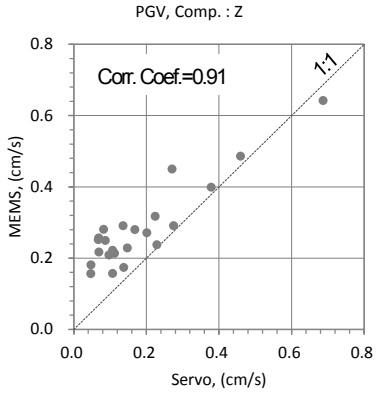
(6) Y 成分の PGV



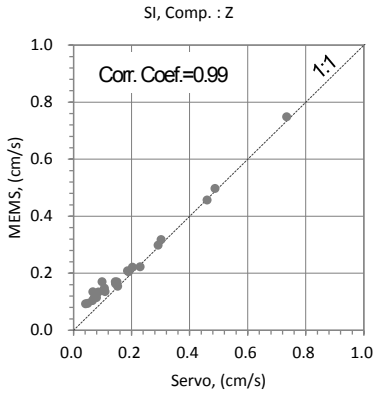
(10) Y 成分の SI 値



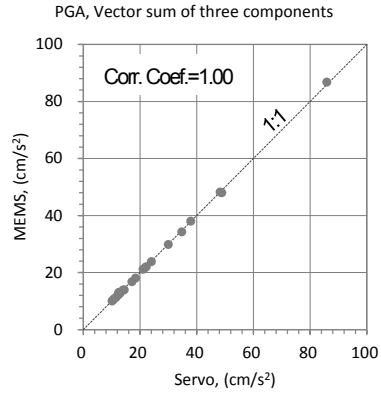
(3) Z 成分の PGA



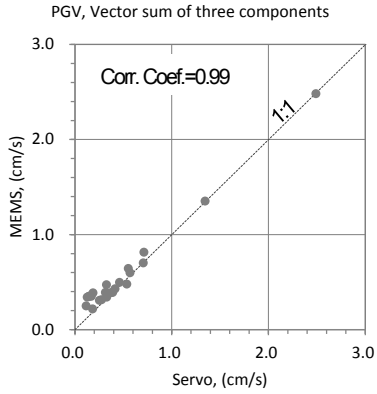
(7) Z 成分の PGV



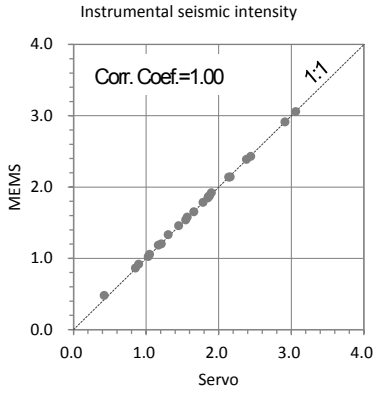
(11) Z 成分の SI 値



(4) 3 成分ベクトル合成の PGA

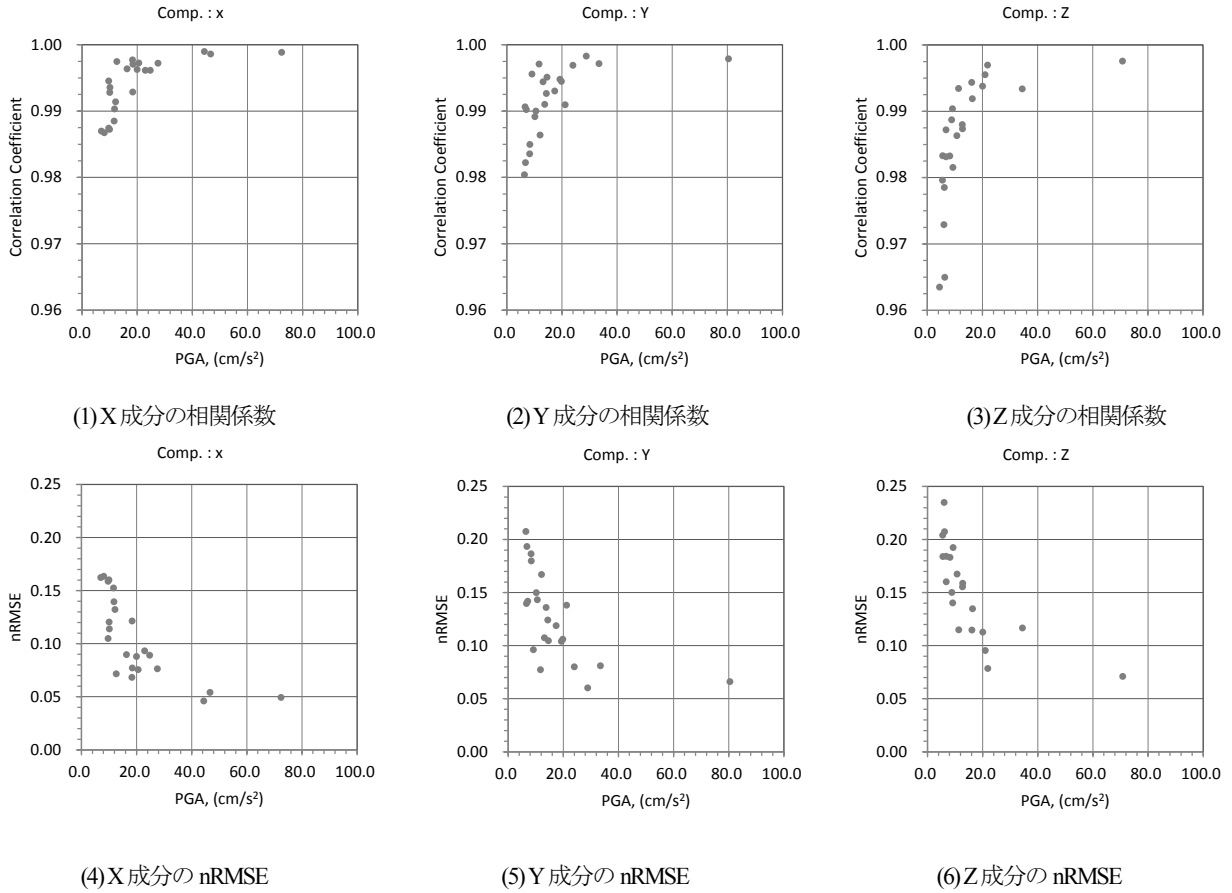


(8) 3 成分ベクトル合成の PGV



(12) 計測震度

図-13　地震動強さパラメータの比較



(1) X 成分の相関係数　(2) Y 成分の相関係数　(3) Z 成分の相関係数

(4) X 成分の nRMSE　(5) Y 成分の nRMSE　(6) Z 成分の nRMSE

図-14　時刻歴波形の一致度指標の比較 (1)

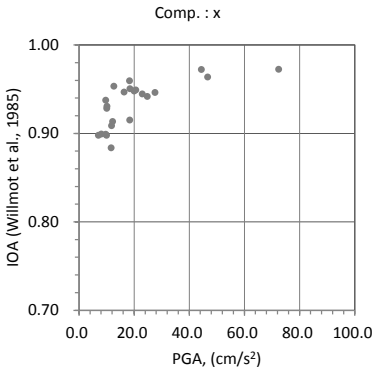
振幅の大きい EQ.19 については，MEMS の低周波数側でノイズの混入が認められるものの，小振幅の場合と異なり，地震波の信号レベルよりは十分に小さいと言える．なお，高周波数側については，収録装置で自動的にフィルター処理が行われるため，ノイズの有無は確認できない．しかし，MEMS のデータシート [9]によると，10Hz～1kHz の周波数応答関数が 1.0 倍で一定値となることから，MEMS の観測記録の高周波数側については問題は生じないものと思われる．また，同データシートからは 10Hz 以下の低周波数帯についてはデータが存在しないため，どのような周波数特性を有するのかは不明である．

図-9 および**図-10** の MEMS の記録の低周波数側の振幅レベルはほぼ同程度であることから，入力信号のレベルに大きく依存するものではなく，ある一定レベルの振幅を有するものと推察される．そこで，常時微動を計測した結果についての比較を行った．**図-11** および**図-12** に 2 日間に分けて計測した常時微動観測記録のフーリエスペクトルを示す．各時刻歴データの最大振幅はサーボ型で 0.02～0.1cm/s^2，MEMS で 0.5～0.8cm/s^2 である．分析に使用した継続時間は，それぞれ 23 秒と 22 秒であり，0.2Hz の Parzen window で平滑化処理している．なお，常時微動計測は**図-1** の実験サイトではなく，据付け前の準備段階時に工場内において，静穏な環境下で計測したものである．図より，サーボ型地震計の計測結果は MEMS に比べて振幅レベルが有意に小さいことが分かる．また，MEMS で計測した常時微動記録の低周波数側での振幅レベルは，地震観測時のものとほぼ同程度の大きさである．従って，MEMS による観測結果には常に低周波数側に一定レベルのノイズが混入しているものと思われる．

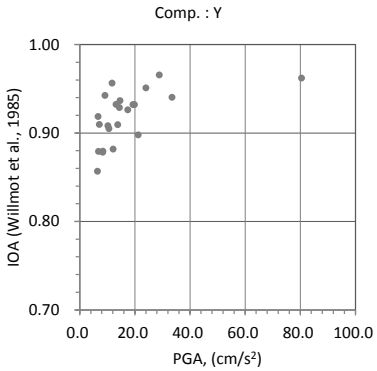
以上より，地震動レベルが十分大きい場合には，MEMS のノイズレベルは相対的に小さくなることから，その影響は小さくなるものと思われる．

(3)　地震動強さの特性値に関する検討

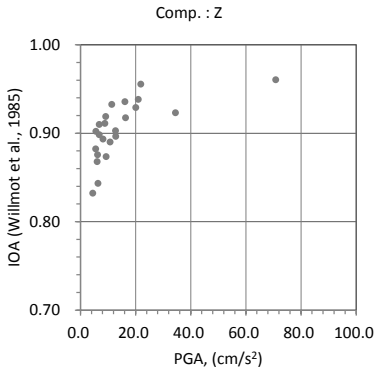
地盤における地震動強さを表す代表的な特性値として，PGA，PGV，SI 値，計測震度などがある．ここでは，これらのパラメータについて，MEMS とサーボ型地震計の各観測値による算定結果を比較した．なお，PGV については加速度記録の時刻歴を数値積分して求めた．この時，全ての記録に対して一律 0.1Hz のハイパスフィルター処理を行った．また，3 成分ベクトル合成の PGA と PGV は，3 成分の時刻歴を時間領域でベクトル合成して求めた．SI 値は周期 0.1～2.5 秒間の速度応答スペクトルの平均値としている．



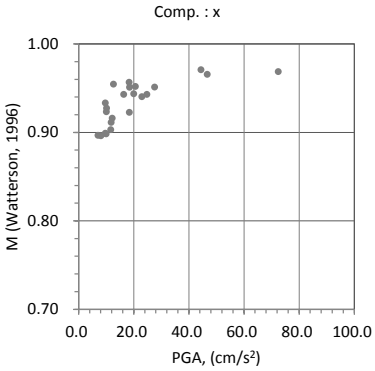
(7)X 成分の IOA



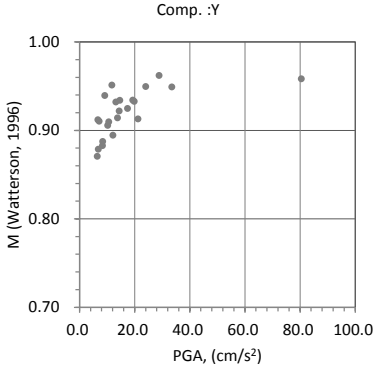
(8)Y 成分の IOA



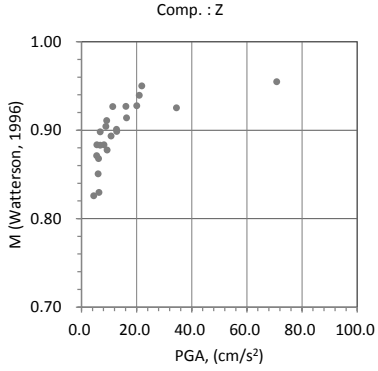
(9)Z 成分の IOA



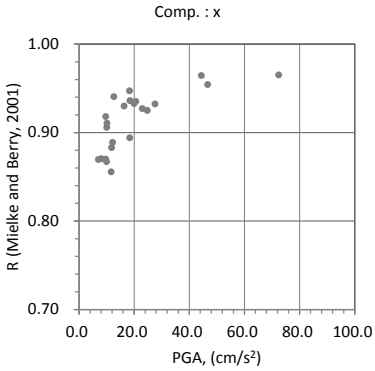
(10)X 成分の M 指標



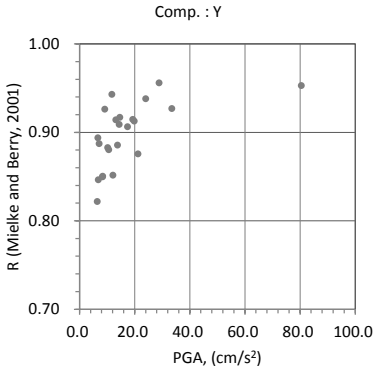
(11)Y 成分の M 指標



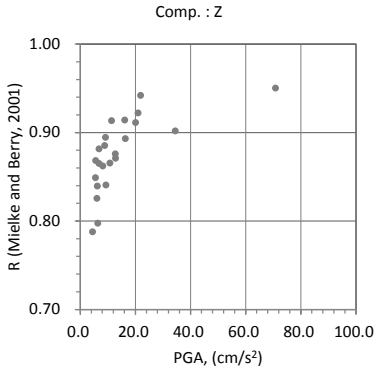
(12)Z 成分の M 指標



(13)X 成分の$\mathfrak{R}$指標



(14)Y 成分の$\mathfrak{R}$指標



(15)Z 成分の$\mathfrak{R}$指標

図-14　時刻歴波形の一致度指標の比較(2)

図-13 に地震動強さ特性値の比較を示す．図中には両者の相関係数も示している．図より，PGA については両者の対応が非常に良好である．一方，PGV については，値が小さいと一致度合が低下する傾向が見られ，Z 成分でその傾向が顕著に表れている．SI 値の Z 成分についても，値が小さい領域で対応の乱れが見られる．地震波の Z 成分は，水平成分と比較して短周期成分が卓越することが影響していると思われる．計測震度については，両者はほぼ一致している．

以上より，速度に関係する特性値について，振幅が小さい領域で精度が低下する傾向が見られた．いずれの場合も，MEMS で計測された記録の特性値は，サーボ型地震計から得られた値より大きくなる傾向が見られる．先に周波数特性の比較で分かった通り，MEMS の記録では低周波数側にノイズが混入していることから，実際より過大評価される現象が生じているものと思われる．

(4)　時刻歴波形の一致性に関する検討

MEMS とサーボ型地震計で得られた加速度時刻歴波形の一致度を，以下 a)～e)に示す指標を用いて評価した．

ここで，各指標は Allen and Greenslade (2012)によって時刻歴波形の一致性を検討する際に用いられたものである．Allen and Greenslade (2012)では，相関係数や正規化 RMSE よりも，IOA や M，$\Re$の方が比較対象の差異に対して感度が高いことから，時刻歴波形の一致度を評価する指標として優れているとしているが，相関係数や RMSE は一般によく知られた指標であることから，ここでは敢えて両指標を加えて比較している．

なお，以下の式中のパラメータは，$w_{MEMS}(t_i)$：MEMS で観測された地震波の時刻歴，$w_{Servo}(t_i)$：サーボ型地震計で観測された地震波の時刻歴，$\overline{w}_{MEMS}$：MEMS で観測された地震波の平均値，$\overline{w}_{Servo}$：サーボ型地震計で観測された地震波の平均値，σ_{MEMS}：MEMS で観測された地震波の標準偏差，σ_{Servo}：サーボ型地震計で観測された地震波の標準偏差，である．

a) 相関係数(r)

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left\{w_{MEMS}(t_i)-\overline{w}_{MEMS}\right\}\left\{w_{Servo}(t_t)-\overline{w}_{Servo}\right\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left\{w_{MEMS}(t_i)-\overline{w}_{MEMS}\right\}^2\cdot\sum_{i=1}^{n}\left\{w_{Servo}(t_t)-\overline{w}_{Servo}\right\}^2}} \quad (1)$$

$$(-1\le r\le 1)$$

b) nRMSE (Normalized Root Mean Square Error)

$$\mathrm{nRMSE}=\frac{1}{\sigma_{Servo}}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\{w_{MEMS}(t_i)-w_{Servo}(t_i)\right\}^2} \quad (2)$$

$$(\mathrm{nRMSE}\ge 0)$$

c) IOA (Index of Agreement after Willmott et. al., 1985)

$$\mathrm{IOA}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|w_{MEMS}(t_i)-w_{Servo}(t_i)\right|}{\sum_{i=1}^{n}\left\{\left|w_{MEMS}(t_i)-\overline{w}_{Servo}\right|+\left|w_{Servo}(t_i)-\overline{w}_{MEMS}\right|\right\}} \quad (3)$$

$$(0\le \mathrm{IOA}\le 1)$$

d) M (Watterson's (1996) Transformed Mielke Index)

$$M=\frac{2}{\pi}\sin^{-1}\left\{1-\frac{\mathrm{MSE}}{\sigma_{MEMS}^2+\sigma_{Servo}^2+\left(\overline{w}_{MEMS}-\overline{w}_{Servo}\right)^2}\right\} \quad (4)$$

ここで，

$$\mathrm{MSE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\{w_{MEMS}(t_i)-w_{Servo}(t_i)\right\}^2$$

$$(-1\le M\le 1)$$

e) $\Re$ (Mielke and Berry, 2001)

$$\Re=1-\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|w_{MEMS}(t_i)-w_{Servo}(t_i)\right|}{\frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left|w_{MEMS}(t_j)-w_{Servo}(t_i)\right|} \quad (5)$$

$$(\Re\le 1)$$

図-14 に時刻歴波形の一致度指標の比較を示す．ここで，各指標の値はサーボ型地震計で得られた PGA の値に対して記している．全ての記録に対して，相関係数による比較では，水平成分で 0.98 以上，鉛直成分で 0.96 以上と，一般的に相関が高いと判断されるような値となっている．Allen and Greenslade (2012)の指摘している通り，IOA，M，$\Re$の各指標は，相関係数と比較して時刻歴波形の違いを敏感に反映していることが分かる．nRMSE については，PGA が大きい場合は値が小さいものの，一致度合いの良否を定量的に示すのは難しい．全ての指標に共通していることは，PGA が小さい時には両センサーの時刻歴の違いを検出していることである．**図-14** の結果より，PGA が概ね 20cm/s^2 を下回る場合に，両者の違いが顕在化する可能性を示している．

4. まとめ

本研究は，広域かつ稠密な地震観測網の実現を目指し，廉価な MEMS チップによる地盤震動計測の実現性について検討した．方法としては，MEMS とサーボ型加速度計との同時観測で得られた実地震波のデータを用いて，各種特性について比較検討を行った．本研究で得られた知見を以下にまとめる．

- MEMS による観測記録には低周波数側に一定レベルのノイズが混入していることが分かった．
- PGA と計測震度については，振幅レベルが小さい領域でも MEMS とサーボ型地震計との間で殆ど差異は生じないことが分かった．一方，低周波数側の信号が重要になってくる PGV や SI 値については，値が小さい場合に MEMS の計測結果が過大評価になることが分かった．
- 時刻歴波形の比較からは，PGA が概ね 20cm/s^2 を下回る場合に，MEMS の観測結果はサーボ型との一致性が低下する可能性がある事が分かった．

以上より，ある程度以上の加速度レベルが必要な強震動を対象とする場合においては，MEMS の利用は大きな問題とならないものと考えられる．しかし，振幅レベルの小さい弱震動記録を用いた分析に用いる場合には，低周波数側のノイズの影響が無視し得なくなるため，十分な注意が必要となる．

謝辞：本研究を実施するにあたり，㈱勝島製作所及び東電タウンプランニング㈱のご協力を得ました．また，震源情報として気象庁一元化処理震源リストを利用させて頂きました．関係各位に謝意を表します．

参考文献

1) 栗田哲史，高橋聡，安中正：関東地方の揺れやすさ分布特性，日本地震工学会論文集，第 10 巻，第 2 号，pp.41-56，2010.
2) 新垣芳一，栗田哲史，安中正，岡田浩士：関東平野の工学的基盤における揺れやすさ特性のゾーニングに関する一検討，日本地震工学会論文集，第 15 巻，第 7 号，pp.242-252，2015.
3) 栗田哲史，新垣芳一：関東地方における地震動地域特性のばらつきに関する基礎的検討，土木学会論文集 A1，Vol.72，No.4，pp.I_1-I_11，2016.
4) 浅沼宏：地震計測のためのマイクロセンサに応用，地震トピック，地震調査研究推進本部，https://www.jishin.go.jp/resource/column/2009_0905_03/.
5) 小野祐輔，清野純史，小林望，新垣芳一，高橋天平：小型センサーを用いた構造物の地震被害の即時判定法の提案，土木学会論文集 A1，Vol.65，No.1，pp.705-709，2009.
6) 齋藤修，千葉宣朗，村上哲，安原一哉：MEMS 加速度センサ IC タグの超低周波特性考察，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-064，pp.127-128，2010.
7) 野田俊太，是永将宏，伊藤賀章，山本俊六，岩田直泰：ポータブル地震監視装置・SPOT 地震計の開発と自然地震観測，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，Ⅰ-196，pp.391-392，2012.
8) 黒田卓也，中野公太，高瀬和男：地震による構造物被害を IoT で監視する 3 軸加速度計の開発，土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集，CS14-014，pp.27-28，2017.
9) アナログ・デバイセズ㈱：ADXL354/ADXL355 データシート，Rev.0，pp.1-41，2017.
10) Allen, S. C. R. and Greenslade, D. J. M. : Indices for the Objective Assessment of Tsunami Forecast Model, Pure and Applied Geophysics, DOI 10.1007/s00024-012-0522-4, 2012.

INVESTIGATION ON THE PRACTICAL APPLICABILITY OF MEMS CHIPS TO GROUND MOTION OBSERVATION

Tetsushi KURITA

In order to assess the possibility of dense seismograph network, applicability of the compact and low price MEMS chips to seismic observation network was investigated. MEMS and conventional servo type seismograph were installed all together at the experimental site in the Kanto region. It is found that the low frequent noise is mixed in the observation record by MEMS. Regarding the PGAs and instrumental seismic intensities, there is little difference in the both sensors. On the one hand, PGVs and SI-values obtained from MEMS are overrated in case of small values. From the comparison of time histories, the agreements between the MEMS and servo type seismograph have a chance to drop down when PGAs are less then almost 20cm/s^2.