第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

大型振動台上に設置したサーボ型加速度計とMEMS型加速度計を有する地震計システムに記録された加速度波形の比較

矢部正明[1]・張 広鋒[1]・山本一貴[2]・水谷亮勝[3]

[1]正会員　博（工）　一般財団法人首都高速道路技術センター　構造技術研究所（〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目10番11号）
[2]正会員　修（工）　一般財団法人首都高速道路技術センター　構造技術研究所（〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目10番11号）
[3]正会員　一般財団法人首都高速道路技術センター　構造技術研究所（〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目10番11号）

1. はじめに

半導体加速度センサを用いたMEMS(Micro-Electro-Mechanical-Systems)型加速度計は，サーボ型加速度計を用いた強震計よりも小型かつ安価に製造できるため，構造物の地震応答の観測にも用いられてきている[1)]．強震計1台あたりのコストを抑え，高密度な地震観測を行うことができる点が，MEMS型加速度計を用いた強震計の利点である[2)]．無線を用いて各強震計間の時刻同期できる地震計システム[1)]も登場しており，構造物の集中的な地震観測システムとしての期待も大きい．しかし，半導体加速度計センサの自己ノイズは大きく，機種によっては数galとなるため周期帯域によっては構造物の有意な地震応答の記録がノイズに埋もれてしまうこともある[2)]．

本報告は，現在実用化されているMEMS型加速度計を用いた強震計によって記録される加速度波形が，実際の加速度波形の情報をどの程度正しく記録できているかを確認するために，大型振動台上にサーボ型加速度計とMEMS型加速度計を搭載した強震計を設置し、サーボ型加速度計を搭載した強震計による加速度記録とMEMS型加速度計を搭載した強震計の加速度記録を比較したものである．

2. 対象とした強震計と加振実験

対象とした強震計は，**表-1**に示すサーボ型加速度計を搭載した強震計(1機種・2台)とMEMS型加速度計を搭載した強震計(4機種・13台)である．何れの強震計ともに，水平成分2方向と鉛直成分の計3方向に感応する．表に示すように，公開されている情報だけでは，強震計としての感応特性を知ることはできない．

表-1　比較対象とした加速度計

型　式	サンプリング周波数	カットオフ周波数	備考
サーボ型	100Hz	非公開	A社サーボ
MEMS型			A社MEMS1
			A社MEMS2
		31.25Hz	B社MEMS1
		16Hz	B社MEMS2

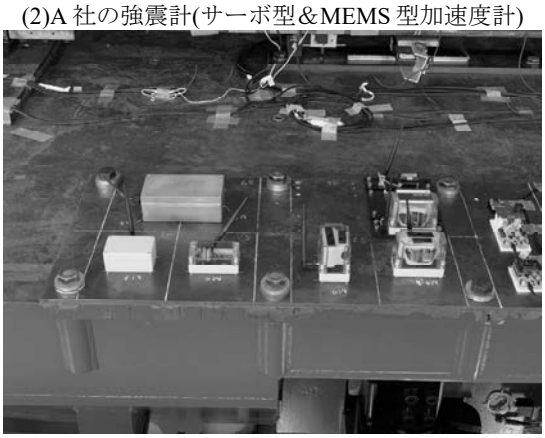
大型振動台を用いた加振実験は，**写真-1**に示すように，橋梁を模擬した大型模型を設置した状態で行われている．**表-1**に示す強震計による加速度波形の計測は，その加振実験の際に相乗りする形で行われているので，強震計は振動台の縁付近に設置されている．振動台上に大型の試験体を載せて加振した場合，振動台の運動は試験体の影響を強く受け，命令通りの波形を再現できなくなる．振動台の制御システムには，命令通りの波形を再現するための制御手法が整備されているが，完全ではない．最適な制御条件は，試験体の条件や加振波形が変わる毎に変化するため，加振ケース毎にその制御条件を定めるための予備加振を行うことが望まれるが，予算と時間の制約から，試験体の条件が変化する時にだけ，制御条件の調整が行われることが多く，対象とした加振実験もそうである．3次元振動台は，試験体の重心と加振力点の位置が異なるため前後・左右・上下の3方向の動きに加えて回転運動も加わるため，6方向の動きを同時に制御しながら目標とする3次元の波形（命令通りの波形）を再現させる必要がある．この制御も完全ではないため，振動台の縁では回転運動の影響が振動台中央付近よりもより大きくなるため，**写真-1**に示す強震計の設置位置毎に回転運動の影響は異なる．



(1) 試験体と振動台縁に設置した強震計等



(2)A 社の強震計(サーボ型＆MEMS 型加速度計)



(3)B 社の強震計(MEMS 型加速度計)

写真-1 大型振動台上への強震計の設置状況

地震動や構造物の地震応答の観測精度は，アナログ入力信号をセンサによりデジタル信号に変換する仕組みの中で，センサ部だけでなくAD変換部および集録部の性能にも依存するため，それらから成るセンサシステムとしての観測精度を評価する必要がある[3]．A社の強震計とB社の強震計で観測された加速度記録は，それぞれの集録装置や通信システムを用いてクラウド上に格納されているので，その格納された加速度記録を用いて比較を行った．本報告での比較は，サーボ型加速度計とMEMS型加速度計を搭載した強震計を用いた地震観測システムに記録された加速度波形の比較となるが，混乱を避けるため

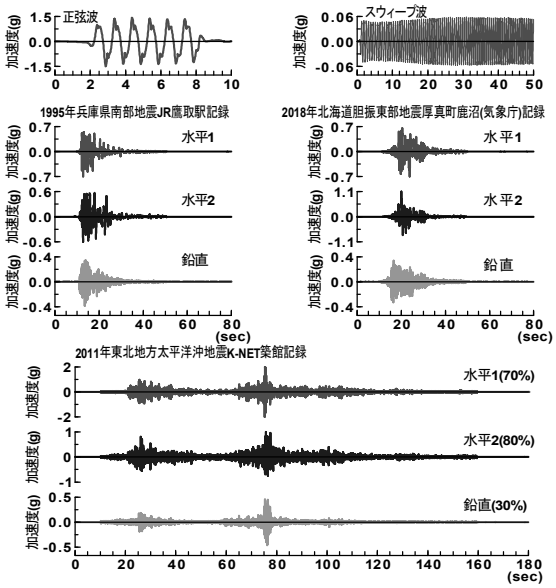


図-1 検討対象とした加振実験の加速度波形(A 社のサーボ型加速度計で記録されたもの)

に以後の記述では，サーボ型加速度計とMEMS型加速度計に記録された加速度波形の比較と記述する．既往の研究でもMEMS型加速度計を搭載した強震計の精度検討は行われているが，小型振動台を用いた検討[4]や実地盤上での最大加速度が100gal未満の地震動の観測[5]および微動[6]を対象としたものである．本報告では，構造物の被害が生じた地震で観測された強震記録を用いた加振実験を対象としているため，既往の研究よりも計測対象となる加速度の強度も大きい．

3. 対象とした加速度波形と着目量

本報告で比較対象とした加速度波形を**図-1**に示す．定常加振実験は正弦波加振とスウィープ波加振，非定常加振実験は次に示す3種類の強震記録による加振である．定常加振は水平1方向のみの加振実験，非定常加振は水平2方向と鉛直方向の3次元加振実験である．正弦波の加振方向は水平方向2のみ，スウィープ波の加振方向は水平方向1と2である．強震記録は，1)1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅記録，2)2011年東北地方太平洋沖地震K-NET築館記録，3)2018年北海道胆振東部地震厚真町鹿沼(気象庁)記録である．振動台の加振条件の制約により2011年東北地方太平洋沖地震K-NET築館記録は水平1を70%，水平2を80%，鉛直を30%とその振幅を縮小している．1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅記録による加振実験は，水平方向2の一方向加振と水平方向1と2による二方向加振も比較対象とした．**図-2**は，**図-1**に示す加速度波形のフーリエ振幅スペクトルである．強震記録の加速度波形には，周期0.1秒から周期5秒に渡って有意な振幅成分が含まれていることがわかる．

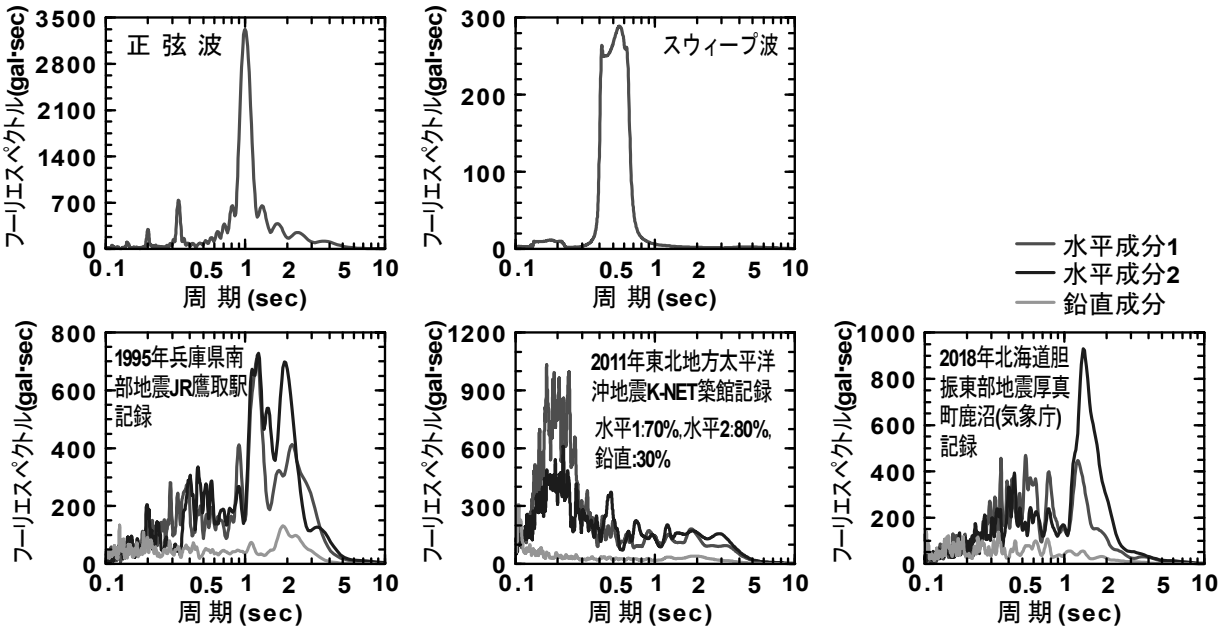


図-2　検討対象とした加振実験の加速度波形のフーリエ振幅スペクトル

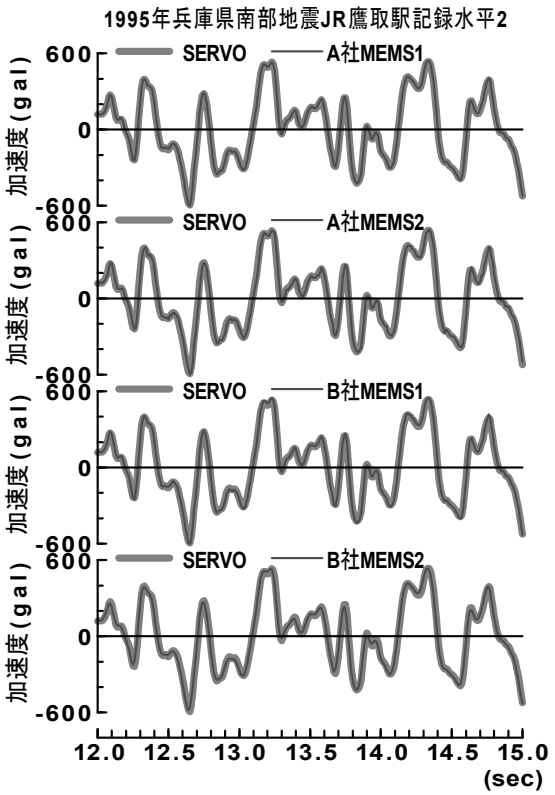


図-3　相互相関関数が時間遅れ 0 秒で最大となるようにした加速度波形の重ね書きの一例

A社の地震観測システムとB社の地震観測システムは，時間の同期がされておらず，記録開始と終了のトリガー則も両社の自由としたので，同じ加振実験でも記録された加速度波形の継続時間はA社とB社で異なっている．そのため，加速度波形の比較を行う際に，2台あるA社のサーボ型加速度計のうち1台を基準とし，その基準となる加速度計で記録された加速度波形の継続時間と一致させた．例えば，MEMS型加速度計で記録された加速度波形の継続時間が短い場合には，後続に振幅0のデータを追加した．

着目したのは，加速度波形の最大・最小振幅値，周期0.1秒から10秒間のフーリエ振幅比，コヒーレンス，地震応答スペクトル比である．上述したようにA社とB社の地震観測システム間で時間の同期は行っていないので，位相特性を表す情報には着目していない．フーリエ振幅比は，2つの波形のスペクトル強度の比を表しており，1.0のときにスペクトル強度が一致する．コヒーレンスは，2つの波形の周波数領域での相関の程度を表しており，1.0に近いほど相関が高い．地震応答スペクトル比は，2つの波形を入力地震動として作用させた減衰定数5%，固有周期0.1秒から10秒(周期間隔を0.1秒で変化)の1自由度系の絶対加速度応答と相対変位応答および相対速度応答の絶対最大値の比を表しており，1.0のとき2つの波形を用いた動的解析結果が一致する．

A社とB社の地震観測システム間で時間の同期が行われていないので，基準となるA社のサーボ型加速度計で記録された加速度波形とMEMS型加速度計で記録された加速度波形の相互相関関数が時間遅れ0秒で最大となるようにMEMS型加速度計で記録された加速度波形の時間軸を移動させてから，上述した着目量を求めた．**図-3**は，基準となるA社のサーボ型加速度計で記録された加速度波形とMEMS型加速度計で記録された加速度波形の相互相関関数が時間遅れ0秒で最大となるようにした加速度波形を重ね書きしたものの一例である．サーボ型加速度計とMEMS型加速度計で記録された加速度波形の振幅値が概ね一致していることがわかる．

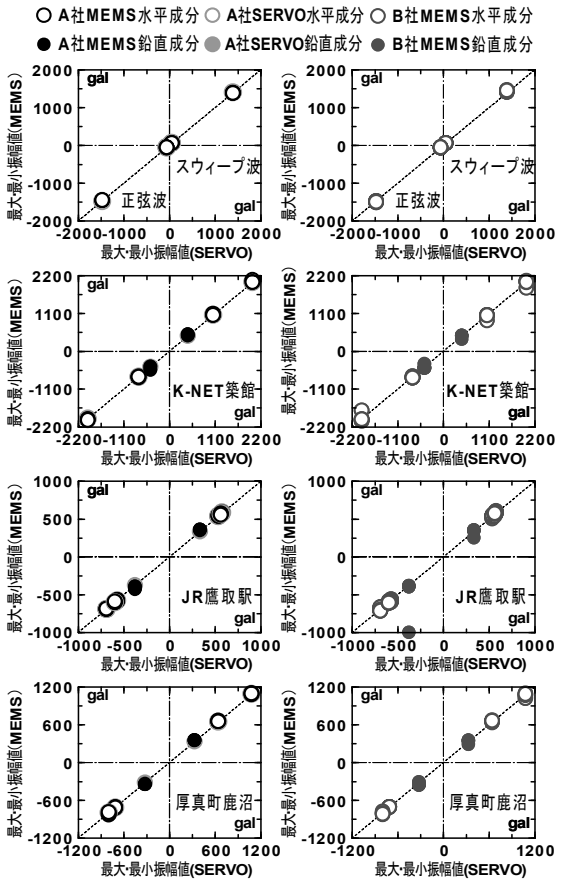


図-4　加速度波形の最大・最小振幅値の比較

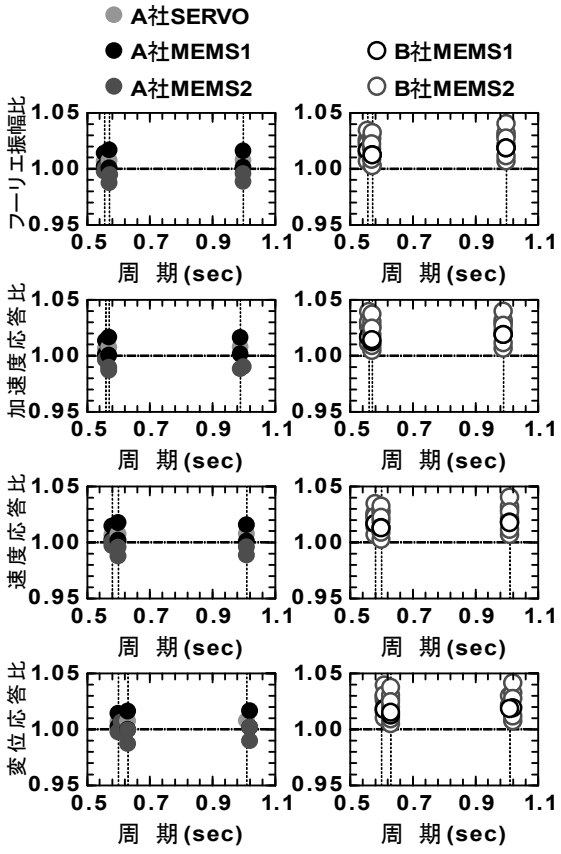


図-5　定常加振での加速度波形のスペクトル比

4. サーボ型加速度計とMEMS型加速度計で記録された加速度波形の比較

（１）加速度振幅の最大・最小値の比較

図-4は，加速度波形の最大振幅値と最小振幅値をA社のサーボ型加速度計（基準とした1台）による値を横軸，縦軸にMEMS型加速度計による値をプロットしたものである．A社のMEMS型加速度計はMEMS1，2ともに各2台，B社のMEMS型加速度計はMEMS1が7台，MEMS2が2台のデータが図には示されている．A社のサーボ型加速度計は同じ機種が2台設置されているので，図には基準としなかったサーボ型加速度計による値も示している．図より，加速度波形の最大振幅値と最小振幅値は，JR鷹取駅記録で加振した際のB社のMEMS型加速度計MEMS2の鉛直成分の最小値を除けば両者は概ね一致していることがわかる．B社のMEMS型加速度計MEMS2の鉛直成分は54.9秒に約-1000galという最小値が瞬間的に生じているため，このような結果になった．

（2）定常加振のスペクトル比

図-5は正弦波加振とスウィープ波加振でのフーリエ振幅スペクトルの最大値と地震応答スペクトルの最大値をサーボ型加速度計とMEMS型加速度計で比較したものである．A社のサーボ型加速度計（基準とした1台）による値を分母，MEMS型加速度計による値を分子とした比をプロットしている．図-2に示すように，定常加振では加速度波形に含まれる周期成分が特定の1つの周期もしくは特定の狭い周期範囲に限定されるので，周期帯域での比ではなく，最大値の比を求めた．図より，何れの加速度計も±5%の範囲に比の値が分布していることがわかる．A社のサーボ型加速度計とMEMS型加速度計の方がB社のMEMS型加速度計よりも比のばらつきの範囲が狭いのは，同じ集録装置に記録されたA社のサーボ型加速度計の加速度波形を基準としているからかもしれない．A社，B社ともに同じ機種でも，加速度計間の個体差があり，その差は概ね±5%の範囲に分布していることがわかる．

（3）強震記録のコヒーレンス

図-6に示すコヒーレンスは，A社のMEMS型加速度計MEMS1・2およびB社のMEMS型加速度計MEMS2は2台，B社のMEMS型加速度計MEMS1は7台のデータを示している．以後の図も同じ数のデータが示されている．A社とB社ともに同じ機種のMEMS型加速度計が2台以上設置されているが，同じ機種でも個体差があるので，個々のMEMS型加速度計の傾向に着目するのではなく，各機種で基準としたA社のサーボ型加速度計との差が大きい結果に着目する．

A社のMEMS型加速度計MEMS1は，鉛直方向のコヒーレンスが周期2秒よりも長周期側で1.0から大きく離れており，周期2秒以下の短周期域でも1.0からずれる所が複数ある．水平方向は，K-NET築館記

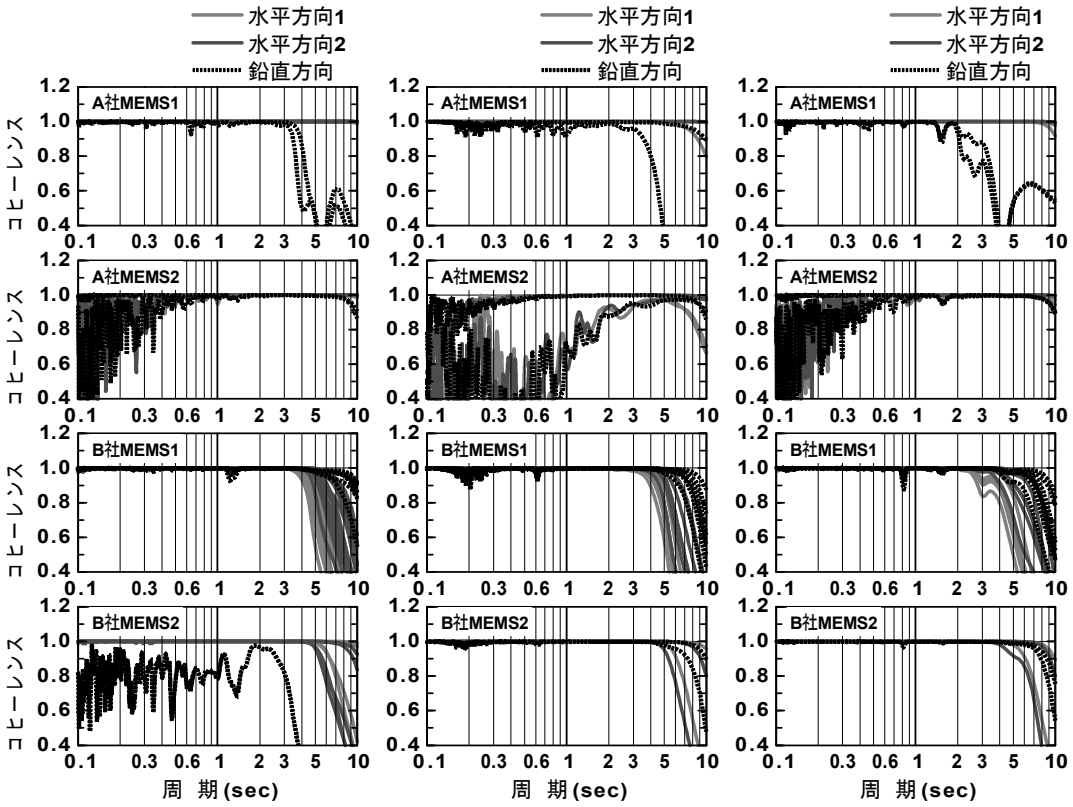


図-6　強震記録による非定常加振実験での加速度波形のコヒーレンス

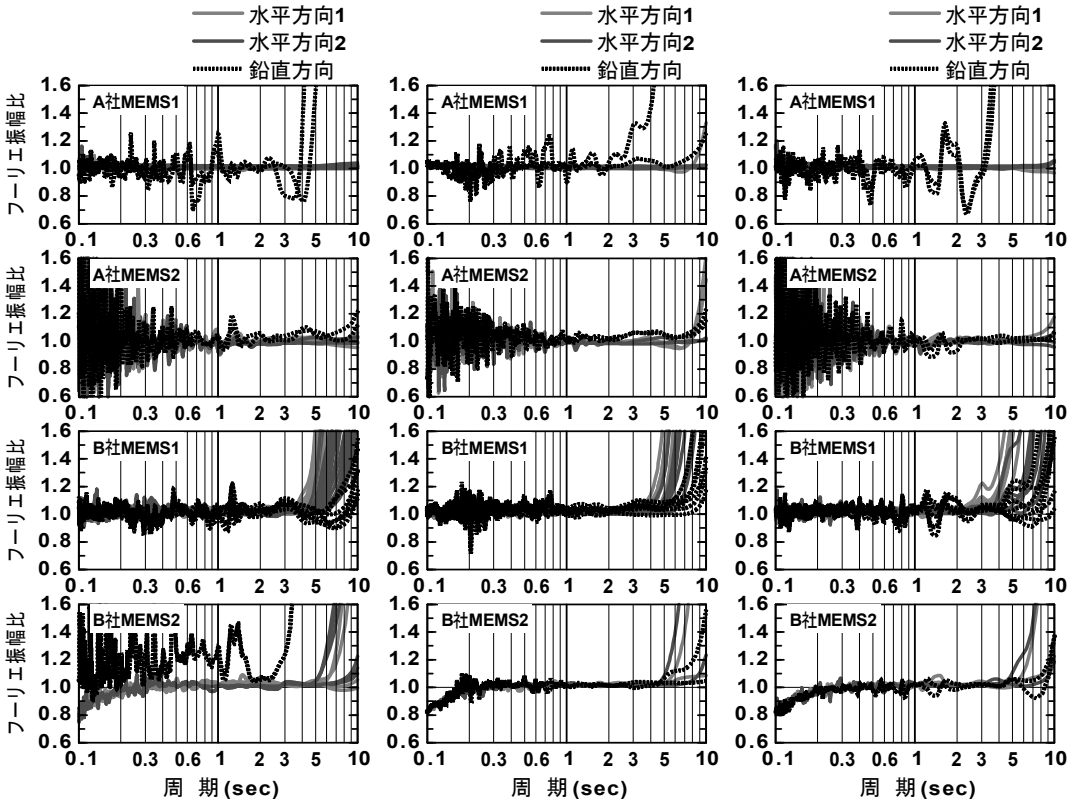


図-7　強震記録による非定常加振実験での加速度波形のフーリエ振幅スペクトル比

録の水平方向1が周期6秒より長周期側，厚真町鹿沼記録の水平方向1が周期8秒より長周期側でコヒーレンスが1.0から離れている．

A社のMEMS型加速度計MEMS2は，個体差が大

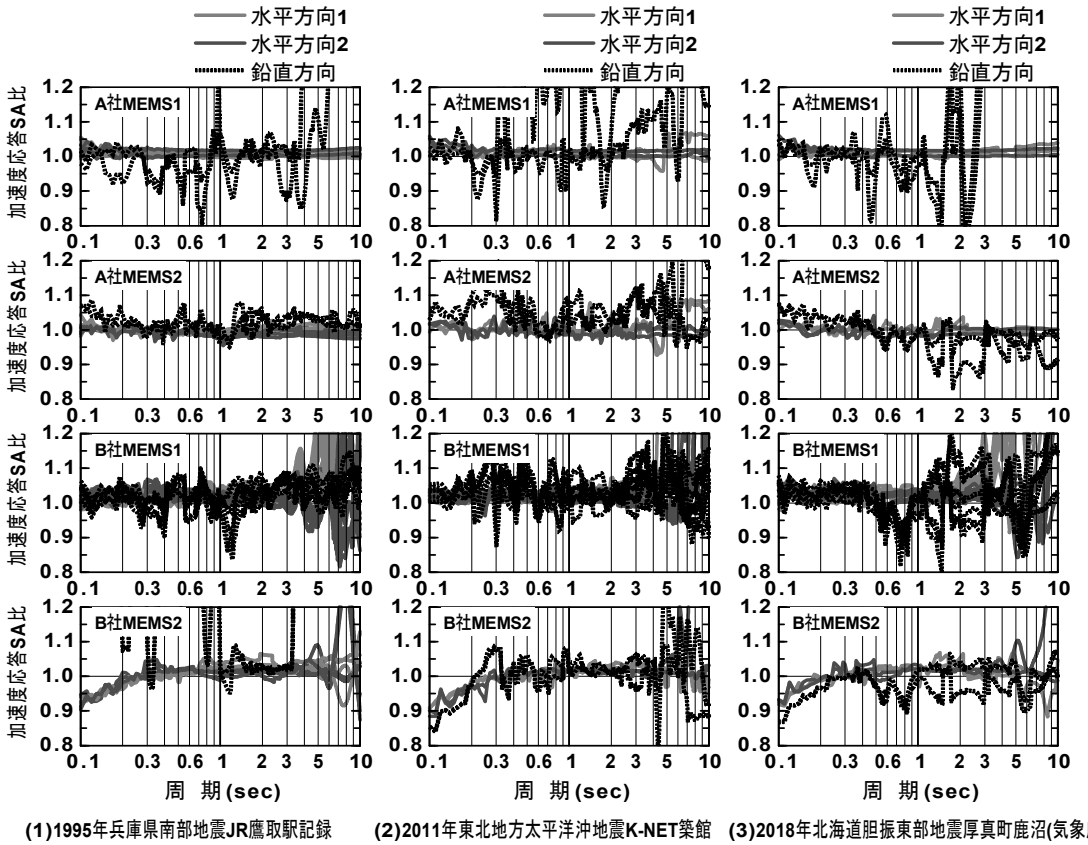


図-8 強震記録による非定常加振実験での加速度波形の加速度応答スペクトル比

きく，JR鷹取駅記録と厚真町鹿沼記録では，周期1.0秒よりも短周期域で3方向のコヒーレンスが1.0から大きく離れている．K-NET築館記録では，周期0.1から10秒の全周期帯域でコヒーレンスが1.0から大きく離れている．

B社のMEMS型加速度計MEMS1は，同じ機種が7台設置されているため，個体差によるばらつきも大きい．水平方向は，水平方向1が周期2秒よりも長周期側で，水平方向2が周期3秒よりも長周期側でコヒーレンスが1.0から大きく離れている．鉛直方向は，周期4秒より長周期側で1.0から大きく離れており，周期2秒よりも短周期域では複数箇所で1.0から離れている．

B社のMEMS型加速度計MEMS2は，JR鷹取駅記録の鉛直方向が全周期帯域でコヒーレンスが1.0から大きく離れている点を除けば，3方向とも周期4秒より長周期側で1.0から大きく離れている．

（4）強震記録のフーリエ振幅スペクトル比

図-7に示すフーリエ振幅スペクトルの比は，B社のMEMS型加速度計MEMS2のK-NET築館記録と厚真町鹿沼記録を除けば，全てのMEMS型加速度計の鉛直方向で1.0を中心に激しく変化している．

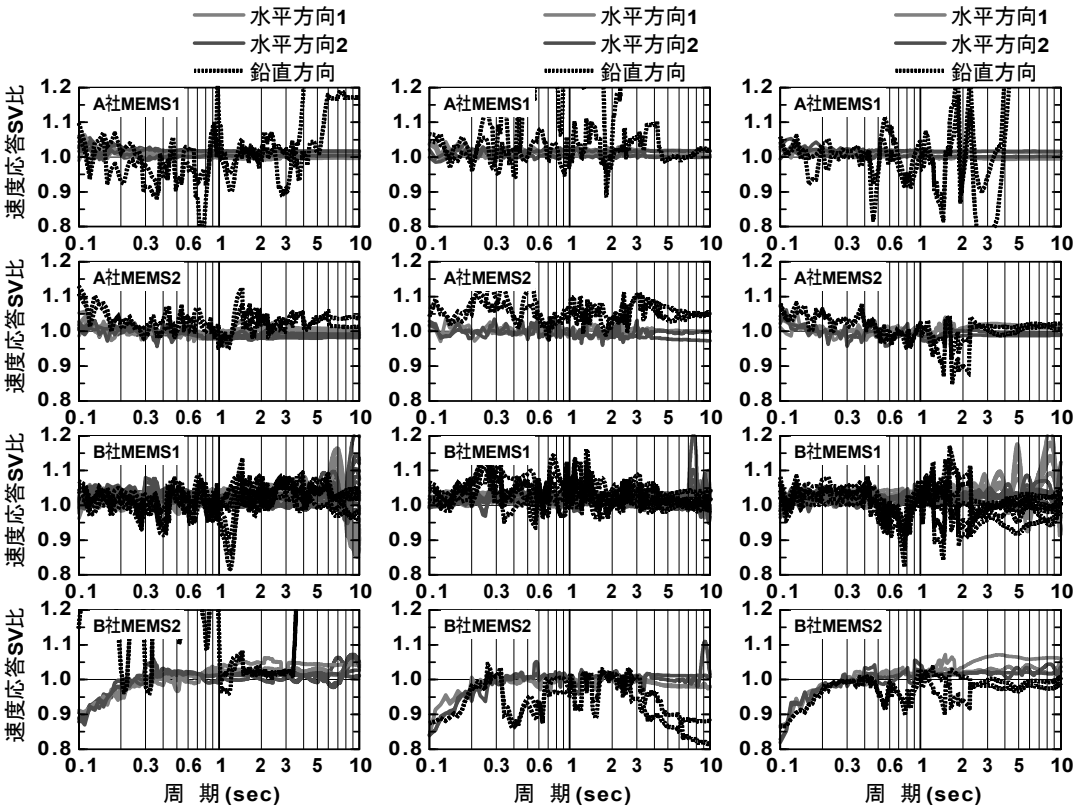
水平方向は， A社のMEMS型加速度計MEMS1は，周期5秒よりも長周期側で比が1.0より大きくなっている．A社のMEMS型加速度計MEMS2は，周期0.1秒から周期1.0秒の間で比が1.0を中心に激しく変化しており，周期4秒よりも長周期側では比が1.0よりも大きくなっている．B社のMEMS型加速度計のMEMS1は周期2秒よりも長周期側で，MEMS2は周期4秒よりも長周期側で比が1.0よりも大きくなっている．

（5）強震記録の地震応答スペクトル比

図-8は加速度応答スペクトルの比，**図-9**は速度応答スペクトルの比，**図-10**は変位応答スペクトルの比を示したものである．鉛直方向は，全てのMEMS型加速度計において，地震応答スペクトル比は1.0を中心に大きく変化している．

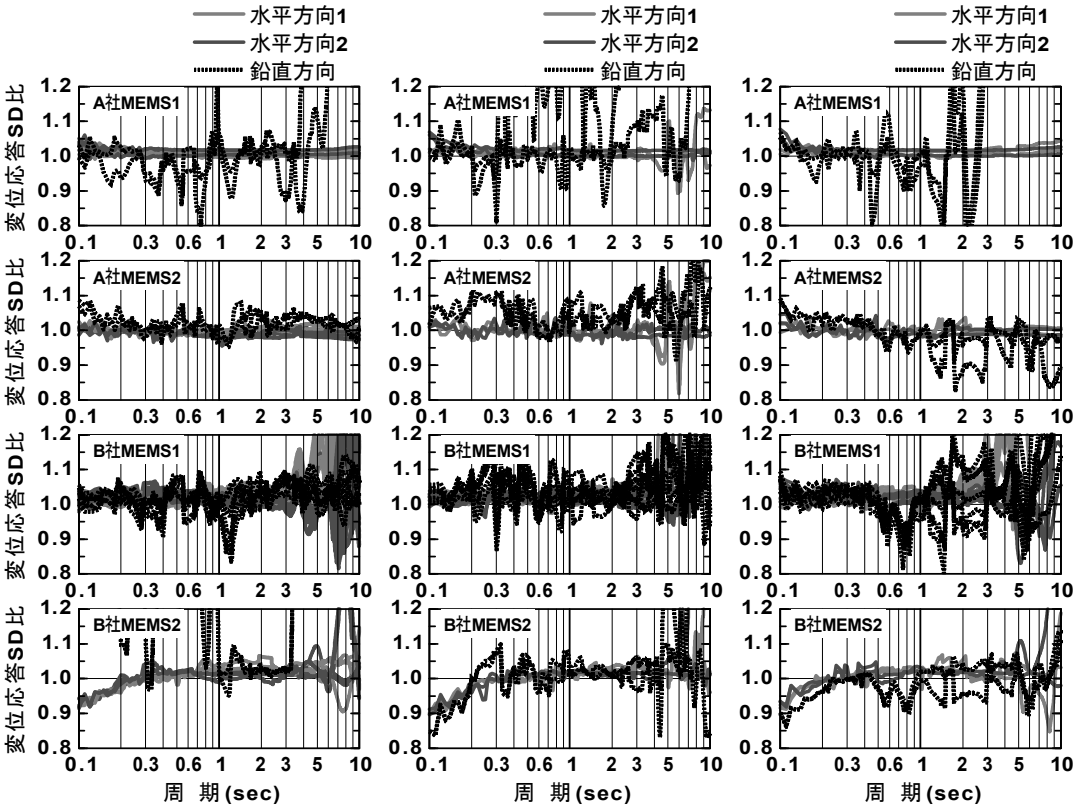
水平方向は，同じMEMS型加速度計であっても強震記録や着目する応答量によって地震応答スペクトル比の値や周期に対する変化の様子が異なっている．A社のMEMS型加速度計は，MEMS1とMEMS2ともに，±20%の範囲で地震応答スペクトル比は変化している．B社のMEMS型加速度計MEMS1は，周期3秒よりも長周期側で地震応答スペクトル比が1.2よりも大きくなっている．B社のMEMS2は，周期0.1秒から0.2秒にかけて地震応答スペクトル比が0.9から1.0に変化しており，周期4秒より長周期側では，加速度応答と変位応答のスペクトル比が1.0を中心に値が大きく変化している．

図-6のコヒーレンスや**図-7**のフーリエ振幅スペクトル比でその値がほぼ1.0であった周期0.4秒から2.0秒の周期帯域でも地震応答スペクトル比は±10%の



(1)1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅記録　(2)2011年東北地方太平洋沖地震K-NET築館　(3)2018年北海道胆振東部地震厚真町鹿沼(気象庁)

図-9　強震記録による非定常加振実験での加速度波形の速度応答スペクトル比



(1)1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅記録　(2)2011年東北地方太平洋沖地震K-NET築館　(3)2018年北海道胆振東部地震厚真町鹿沼(気象庁)

図-10　強震記録による非定常加振実験での加速度波形の変位応答スペクトル比

範囲で激しく変化しているのは，減衰定数5%とい　らと考えられる．
う1自由度系を介して2つの波形の差が増幅されたか

5. まとめ

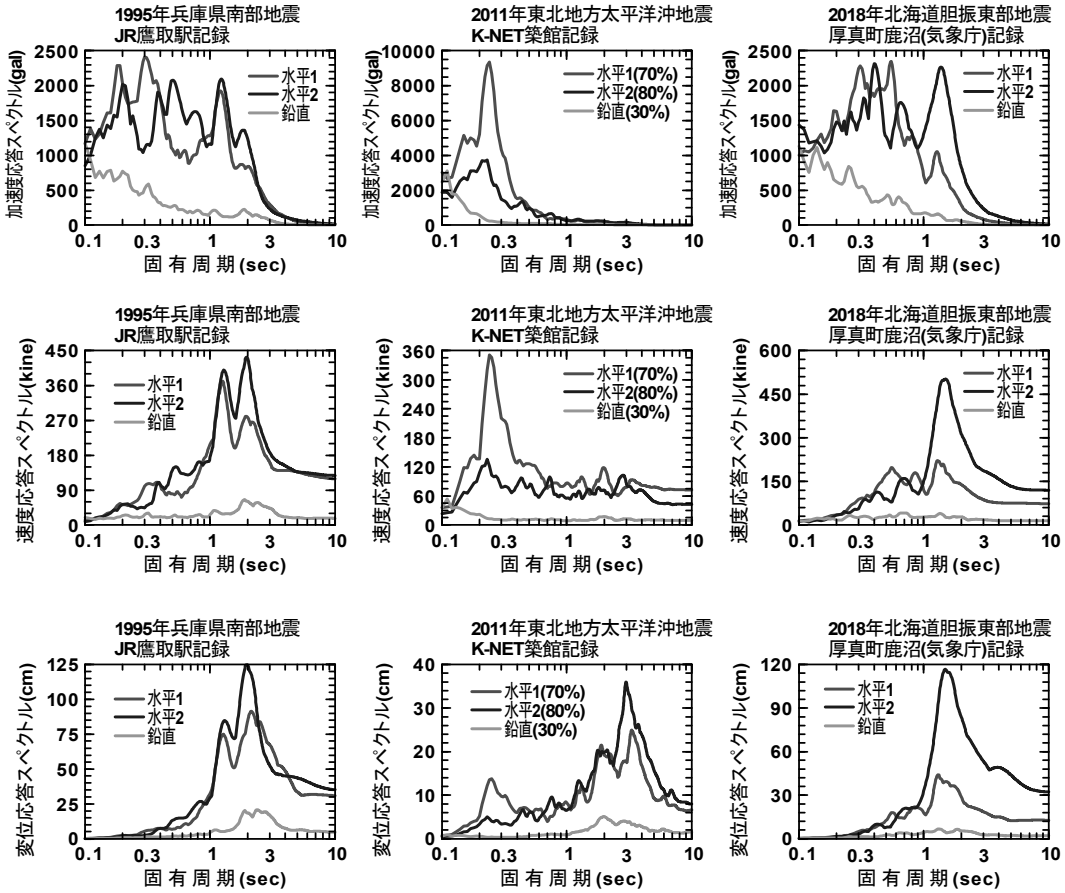
大型振動台上にサーボ型加速度計とMEMS型加速度計を設置して，振動台上の加速度波形を計測し，サーボ型加速度計とMEMS型加速度計で計測される加速度波形を比較した．加速度波形の最大振幅値と最小振幅値は，概ねサーボ型加速度計とMEMS型加速度計で近い値が得られることが確認できた．コヒーレンス，フーリエ振幅スペクトル比，加速度応答スペクトル比，速度応答スペクトル比，変位応答スペクトル比の周期による変化の様子から，MEMS型加速度計で計測される加速度波形の周期2秒もしくは3秒よりも長周期側の成分は，サーボ型加速度計で計測されたものと異なる場合があるので，周期2秒よりも長い固有周期を有する構造物の地震応答の観測にMEMS型加速度計を用いる場合には，振動台を用いた加振実験等によって長周期域の感応性能が所要の性能を満足するかを確認する必要がある．

謝辞：大型振動台上でのMEMS型加速度計を用いた加速度波形の計測は，白山工業株式会社とソナス株式会社のご協力によって実現したものです．ここに記して謝意を表します．

付録　検討対象とした加振実験の加速度波形(**図-1参照**)の地震応答スペクトルを**付図－1**に示す．

参考文献

1) 數井佑丞，藤野陽三，SIRINGO, Dionysius Manly，矢部正明：地震応答モニタリングによる一面吊り斜張橋のモデル妥当性の検証と大地震時挙動の推定，土木学会第73回年次学術講演会講演概要集I部門(CD-ROM)，pp.773-774，2018.
2) 功刀卓，青井真，藤原広行：強震観測－歴史と展望－，地震第2輯，第61巻特集号，pp.S19-S34，2009.
3) 杉崎光一，阿部雅人，奥水聡：慣性計測を用いた鉄道橋モニタリングのためのセンサ性能評価，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.69，No.2，pp.315-328，2013.
4) 中村豊：3次元6自由度振動台による強震動の再現とさまざま地震計を用いた計測，土木学会，震度計の設置促進と震度データの利用高度化に関するシンポジウム，pp.60-70，2007.
5) 栗田哲史：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，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.75，No.4(地震工学論文集第38巻)，pp.I_657-I_666，2019.
6) 松田滋夫，中仙道和之，盛川仁，飯山かほり，坂井公俊：水晶振動子による加速度センサの微動観測への適用性に関する検討，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.76，No.4(地震工学論文集第39巻)，pp.I_793-I-803，2020.



付図-1　検討対象とした加振実験の加速度波形の地震応答スペクトル