

# 性能が異なる各種センサの地盤常時微動計測への適用性検討

中日本建設コンサルタント（株） 正会員 ○永坂 英明  
東海テクノセンター（株） 坪井 誠治  
岐阜大学 国際会員 吉川 高広  
岐阜大学 国際会員 沢田 和秀

## 1. はじめに

地盤の常時微動計測は、震源が明確ではない交通振動等による人工振動、潮流や風等による自然振動に起因する複合的な微弱地盤振動を、地表面に設置したセンサで計測するものであり、この振動を用いて計測地点の地盤振動特性を評価するために行われている。このように、地盤の常時微動計測は、加振を行う必要がなく、地盤を掘削するなどの作業も必要としない非破壊計測であるため、手軽に実施できる特徴から多くの目的に利用されている。また、数分レベルの短時間の計測で、ある程度の成果が得られることも利便性を向上させている。地盤の常時微動計測を利用する簡便な方法の一例としては、同時計測した水平動成分のフーリエ振幅スペクトルを上下動成分のフーリエ振幅スペクトルで除する H/V スペクトルを用いて表層地盤の卓越振動数や S 波速度構造を推定し、これらを用いた地震時の増幅特性推定による地震被害想定や耐震設計の精度向上<sup>1)</sup>が図られている。著者ら<sup>2)</sup>は、こうした地盤の常時微動計測による H/V スペクトルが地盤特性を的確に再現していることを確認するために、PS 検層による S 波速度構造から求めた卓越振動数と比較し、H/V スペクトルが PS 検層による S 波速度構造から求めた卓越振動数と概ね一致していることを確認している。更なる利活用として盛土・埋土の安全性評価<sup>3)</sup>や落石危険度振動調査法<sup>4)</sup>などにも用いられている。一方、加速度センサ発展にあわせ、地盤の常時微動を計測するためのセンサも、古くはバネによる機械式慣性センサからサーボ型加速度計へと変化し、現状ではクォーツ加速度計や MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 加速度計に展開されている。近年では、クォーツ加速度計や MEMS 加速度計の小型化や低コスト化から利用範囲が拡大しているが、性能的に地盤の常時微動計測に適していることを検証している事例は少ない。栗田<sup>5)</sup>による MEMS 加速度計とサーボ型加速度計との比較による常時微動計測の結果として、MEMS 加速度計に  $1/f$  ノイズの混入が示されている例や、松田ら<sup>6)</sup>によるクォーツ加速度計が微動観測に適用する可能性が高いことを示した例が見受けられるが、各センサを用いた総合的な地盤常時微動への適用性確認を実施した例は見受けられない。このため、本検討は高性能クォーツ加速度計、クォーツ加速度計と MEMS 加速度計で同時に地盤の常時微動計測を実施し、各センサが収録した加速度時刻歴波形の分析結果を基にした地盤常時微動への適用性を確認することにした。また、同様のセンサチップを搭載したクォーツ加速度計も複数同時計測することで、チップ個体による感度の差異も確認した。

## 2. 常時微動計測の概要

### 2.1 計測地点

地盤の常時微動計測地点は、古生層から構成された美濃山地と長良川水系の働きにより形成された扇状地の境界付近に位置する岐阜大学(図-1)の周辺 2 地点とした。計測地点を図-2 に示す。常時微動計測の 2 地点選定においては、地盤構造に差があることも考慮したが、最優先としたことは交通量(含む人流)が少なく、計測結果に外乱ノイズを含まない地点とした。計測地点の 1 番目は、大学近郊にある伊自良川堤体上部とした(以下、計測地点①)。計測地点の 2 番目は、大学構内の農地内道路上とした(以下、計測地点②)。計測地点①の全景を図-3 に、計測地点②の全景を図-4 に示す。



図-1 岐阜大学位置（背景図：国土地理院（電子 Web））

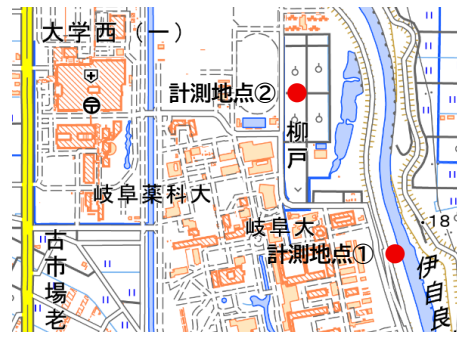


図-2 計測位置（背景図：国土地理院（電子 Web））



図-3 計測地点①全景



図-4 計測地点②全景

## 2.2 計測対象センサ

計測に用いたセンサのセンサ性能であるノイズ密度を表-1 に示す。このうちのソナス社 x04 Pro Portable<sup>7)</sup>（以下、Pro）が高性能クォーツ加速度計であり、この計測結果を評価基準値として用いた。ソナス社 x04 QC Portable<sup>7)</sup>（以下、QC）とロジカルプロダクト LP-WS92-EACS01-2<sup>8)</sup> 2機（以下、LP1 と LP2）は、同じセイコーエプソン製のクォーツ加速度センサ M-A352 を利用しているため、これらの比較でセンサ個体差の確認を行った。ロジカルプロダクトの同一製品である LP1 と LP2 が複数含まれているのは、著者らがこの 2 センサを用いて落石危険度振動調査<sup>9)</sup>を実施しているためである。すなわち、緒方らの落石危険度振動調査法<sup>4)</sup>は、2 センサの伝達関数による評価となっており、本研究では同一地点同時計測によって得られたデータの伝達関数を求め、その値が 1.0 近傍となる振動数範囲を確認する適用性判定を実施した。なお、表-1 の MEMS センサ（以下、MEMS）は、ノイズ密度の公開のみとした。これらによる計測状況を図-5 に示す。図中に示すセンサと図中未掲載の MEMS で同時計測を実施した。



図-5 センサ設置状況

## 2.3 計測方法

常時微動収録時の収録振動数は、すべて 500Hz とし、3 方向成分の収録を行った。収録した加速度時刻歴波形の時刻同期を行うために、野球の硬球を概ね地上 20cm から落下させた衝撃（図-6）を囲まれたセンサ中心のアスファルトに与え、これをトリガーとなるような収録を実施した。具体的には、波形内の衝撃パルス正の最大値から自由振動部が完全に終了した 4 秒間を除外し、それ以降の 12 秒間を抽出して分析対象の常時微動データとした。

表-1 センサー一覧

販売会社：名称	ノイズ密度	呼称
ソナス社 x04 Pro Portable	0.02 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	Pro
ソナス社 x04 QC Portable	0.2 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	QC
ロジカルプロダクト WS92-EACS01-2	0.2 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	LP1
ロジカルプロダクト WS92-EACS01-2	0.2 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	LP2
A 社 B 機種	25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	MEMS

### 3. 常時微動記録の分析

計測した地盤の常時微動記録の分析としては、得られた加速度時刻歴波形による RMS (Root Mean Square) による比較、フーリエ振幅スペクトルの比較として各センサの結果を Pro の結果で除することで Pro と差異が発生する振動数範囲を確認した。時間方向変化を含めた一致度確認として、各センサの計測記録における非定常振幅スペクトルを計算し、この結果の時間断面毎の最大ピーク値発生振動数を求め、これを比較することで時間変動の正確性を確認した。また、落石危度除振動調査<sup>9)</sup>の実務対応として LP1 と LP2 の伝達関数の活用可能振動数範囲を確認した。



図-6 トリガー加振状況

#### 3.1 RMS 値の比較検討

それぞれの計測器で地盤常時微動を計測して求めた加速度時刻歴波形の一例として計測地点①の X 方向成分を図-7 に示す。これらから求めた計測地点①の RMS を表-2 と図-8 に、計測地点②の RMS を表-3 と図-9 に示す。この結果から、MEMS は他のセンサより 10 倍以上大きな値を示しており、用いた MEMS センサでの地盤常時微動振幅を評価することが難しいことを示した。同一センサモジュールである QC, LP1, LP2 は概ね同様の結果となっており、RMS 評価レベルでは個体差が生じていないと言える。ただし、評価基準値の Pro の 3 方向成分が異なる値となっているのに対して QC, LP1, LP2 は概ね 3 方向成分が同一の値となっているため、高性能クォーツ加速度計までの精度を持ちあわせていないことが示された。この乖離がどの振動数帯域で発生しているかを確認するために次項にフーリエ振幅スペクトルによる検討を示す。

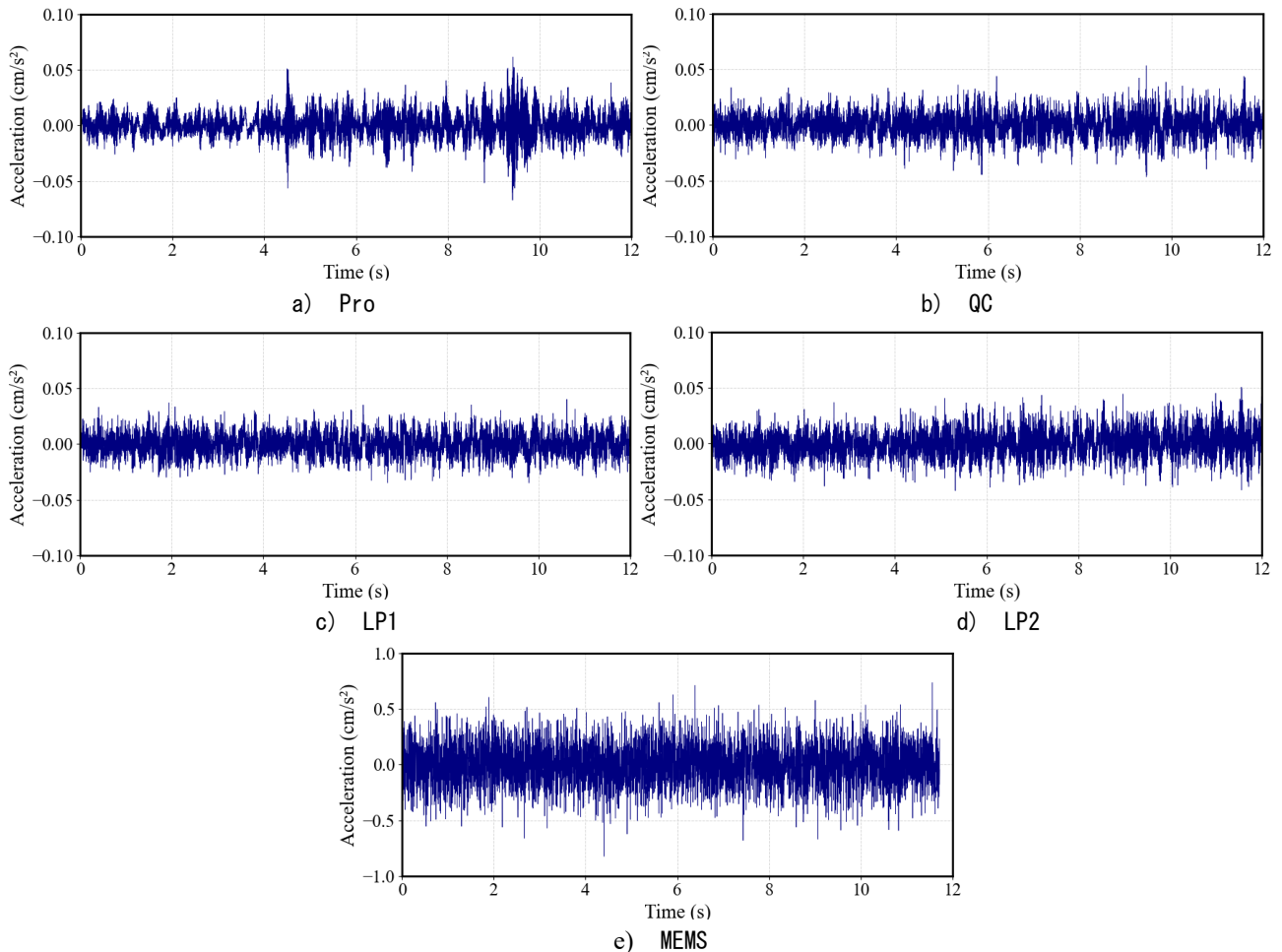


図-7 加速度時刻歴 X 方向成分 計測地点①

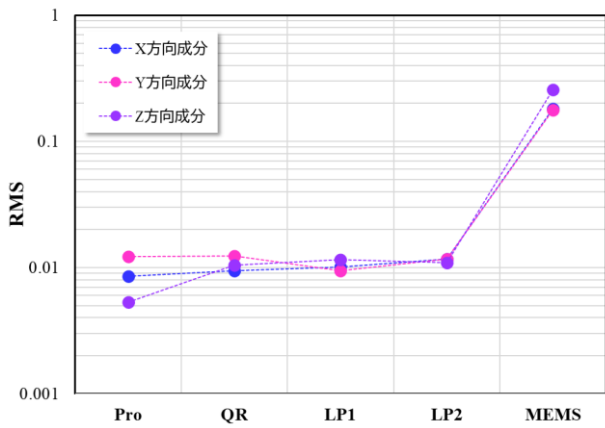


図-8 RMS 値比較：計測地点①

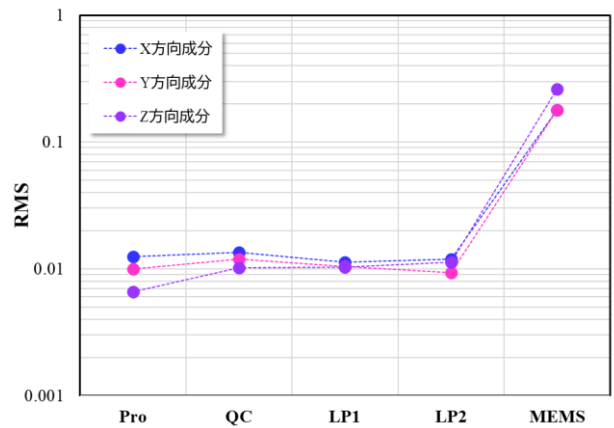


図-9 RMS 値比較：計測地点②

### 3.2 フーリエ振幅スペクトルによる比較検討

振動数帯域での差異を確認するために、フーリエ振幅スペクトルによる比較検討を実施した。このために、各ケースのフーリエ振幅スペクトルに Pro の結果を重ね書きして比較を行った。その一例として計測地点①の X 方向成分の各計測器の結果を図-10 に示す。図-10a の QC、図-10b の LP1、図-10c の LP2 のクォーツ加速度計においては、1.0Hz 以下の低振動成分と 30.0Hz 以上の高振動成分に Pro との差が生じているが、1.0Hz~30.0Hz 間においては一致度が高くなっている。

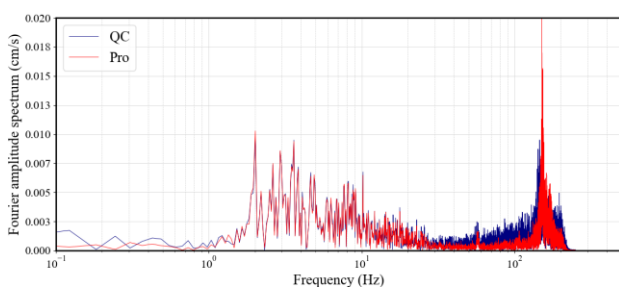
表-2 RMS 値：計測地点①

呼称	RMS		
	X 方向	Y 方向	Z 方向
Pro	0.0122	0.0180	0.0075
QC	0.0117	0.0156	0.0111
LP1	0.0105	0.0096	0.0107
LP2	0.0124	0.0129	0.0131
MEMS	0.1841	0.1757	0.2580

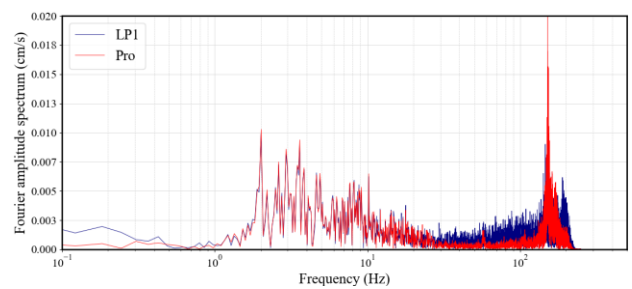
表-3 RMS 値：計測地点②

呼称	RMS		
	X 方向	Y 方向	Z 方向
Pro	0.0125	0.0099	0.0066
QC	0.0136	0.0119	0.0101
LP1	0.0113	0.0104	0.0103
LP2	0.0119	0.0093	0.0112
MEMS	0.1793	0.1795	0.2608

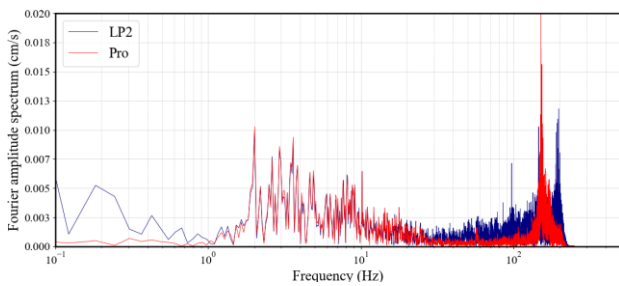
と 30.0Hz 以上の高振動成分に Pro との差が生じているが、1.0Hz~30.0Hz 間においては一致度が高くなっている。このことから、クォーツ加速度計で地盤の常時微動計測を行う場合には、卓越振動数が 1Hz を下回るような軟弱地盤でなければ対応可能なことが示された。図-10d の MEMS では全域でノイズレベルが非常に高いため Pro と一致しない。このため、ノイズ密度が 20~25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  程度の MEMS センサでは地盤の常時微動計測に対応できないことが示された。



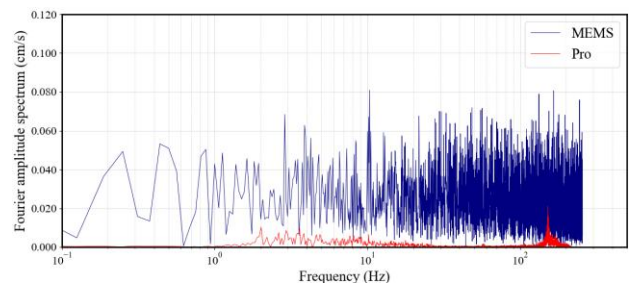
a) QC



b) LP1



c) LP2



d) MEMS

図-10 フーリエ振幅スペクトルの比較 X 方向成分 計測地点①

こうした傾向確認をより顕著に実施し易くするために、各センサのフーリエ振幅スペクトルを Pro のフーリエ振幅スペクトルで除した値について、1.0 近傍の振動数帯域を確認した。計測地点①の各計器の結果を図-11 に示し、同様に計測地点②の結果を図-12 に示す。すべての図中に 3 方向成分を示した。なお、MEMS の結果は縦軸の範囲が他と異なる。クォーツ加速度計の QC, LP1, LP2 の 1.0 近傍範囲は 2.0Hz~20.0Hz であり、この間であれば高性能クォーツ加速度計と同程度の性能であることが示され、若干性能が低下する振幅比 0.5~2.0 程度の範囲を含めると 1.0Hz~30.0Hz 範囲が地盤の常時微動計測に対応が可能と考える。MEMS の計測は、他と比べ全体的に 10 倍程度大きな値となっているため、地盤の常時微動計測に利用できるとは言えない。

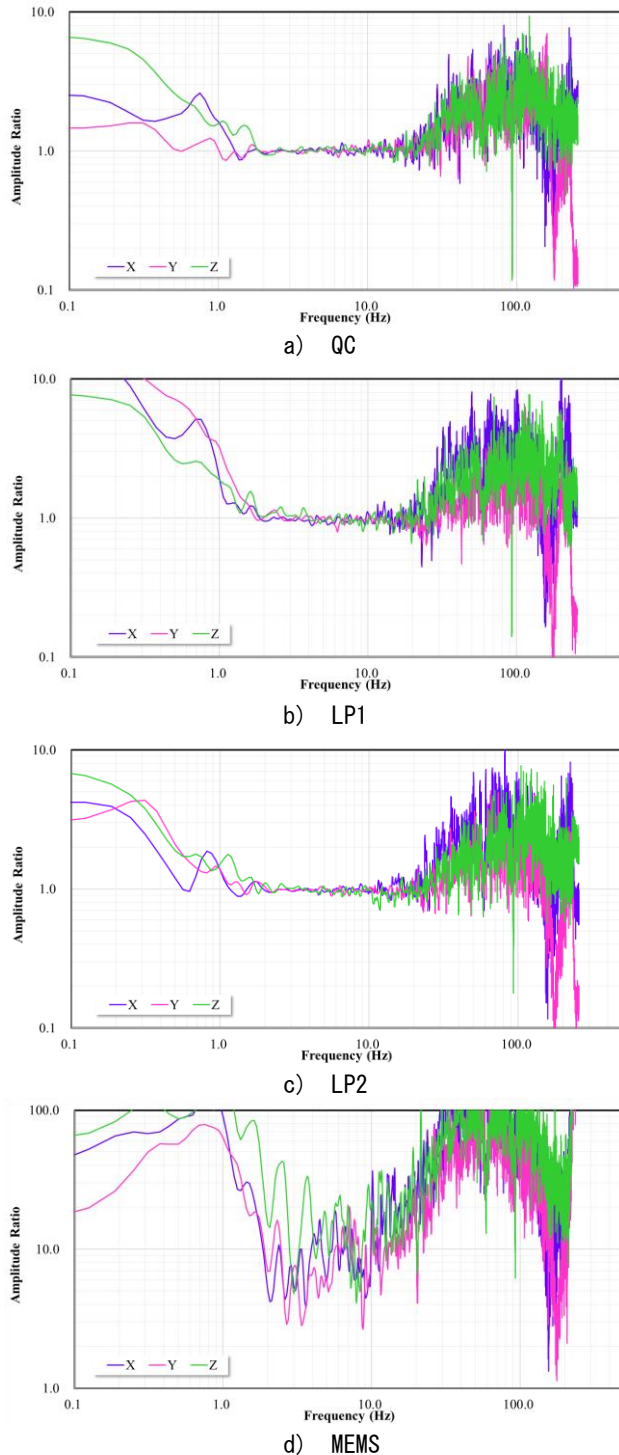


図-11 スペクトル比 計測地点①

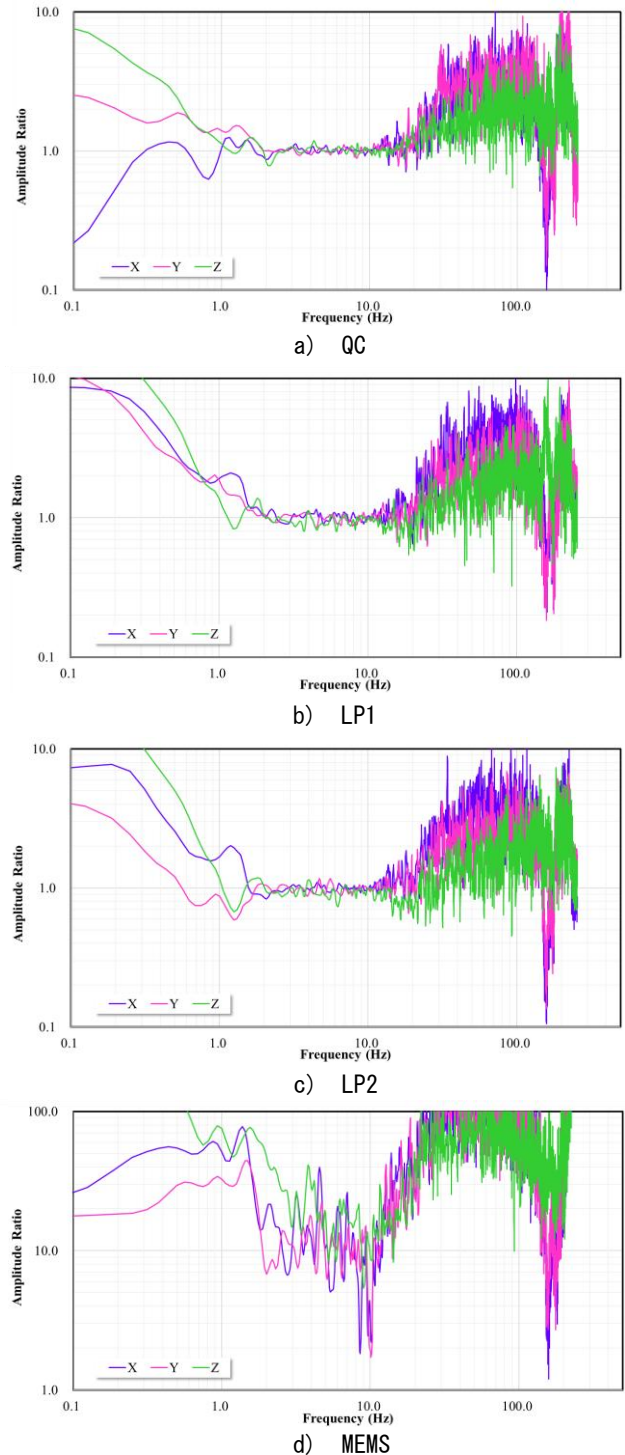


図-12 スペクトル比 計測地点②

### 3.3 非定常振幅スペクトルによる比較検討

これまでの検討により、クォーツ加速度計に個体差は少なく、振動数が 1.0Hz~30.0Hz の範囲であれば地盤の常時微動計測に用いることができる可能性が示された。一方、MEMS センサは地盤の常時微動計測に適していないと言える。クォーツ加速度計は、収録波形全体評価を可能とするフーリエ振幅スペクトル分析での地盤常時微動計測に用いることが可能なことを示した。次に、収録波形時間変化の適用性を確認するために、非定常振幅スペクトル解析<sup>10)</sup>による検討を実施した。本節では QC を例に、卓越振動数の時間変動を同様に求めた Pro の結果と比較した。非定常振幅スペクトルからの卓越振動数時間変化は、図-13 の Pro 計測地点①X 方向成分や図-14 の QC 計測方向①X 方向による非定常振幅スペクトルから、横軸となる常時微動加速度時刻歴波形データ総数の全時間断面に存在する振動数と非定常振幅値の関係から、最大振幅となるピークの振動数を抽出して時間軸に並べた結果である。図-15 に Pro と QC の卓越振動数時間変化を示す。この結果から卓越振動数の時間変化は、同一の傾向であるが、QC において 100Hz 近傍の高振動帯域にノイズ成分の発生が確認できる。そこで、算定範囲を 1.0Hz~30.0Hz に限定して求めた結果を図-16 に示すが、範囲を限定することで卓越振動数の時間変化もほぼ同一となり、ここでもクォーツ加速度計が 1.0Hz~30.0Hz 範囲であれば地盤の常時微動計測に適応可能なことが示された。これらの一致度を数値化するために Pro と QC の各卓越振動数が 0.1Hz 以内誤差で一致する全数との比率を求めると 74.6% となった。表-4 に全計測の一致度算定結果を示し、表-5 に各センサの最大値、最小値と平均値を示す。表-5 よりクォーツ加速度計の平均値は全て 70%以上となっており、1.0Hz~30.0Hz の範囲であれば高性能クォーツ加速度計に近い結果が得られていることが確認できたが、若干の個体差を確認した。MEMS に関しては、一致しない結果となった。

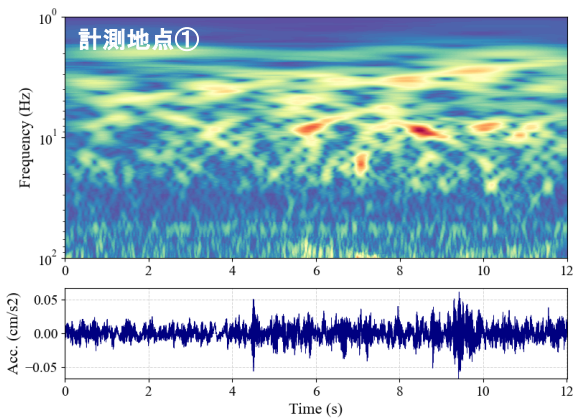


図-13 非定常振幅スペクトル Pro X 方向成分

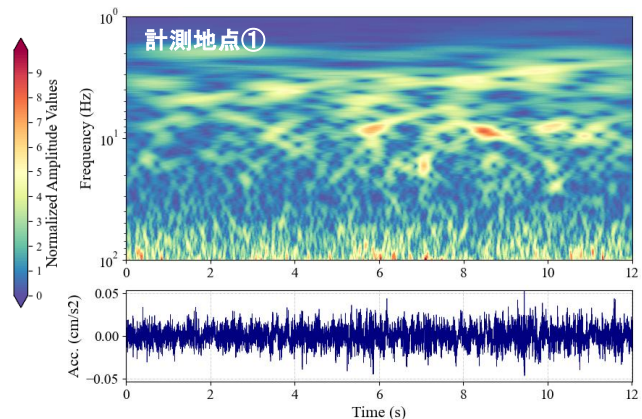


図-14 非定常振幅スペクトル QC X 方向成分

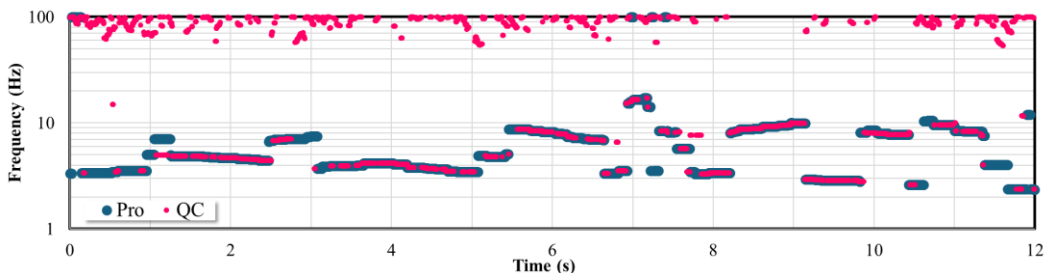


図-15 Pro と QC の卓越振動数時間変化

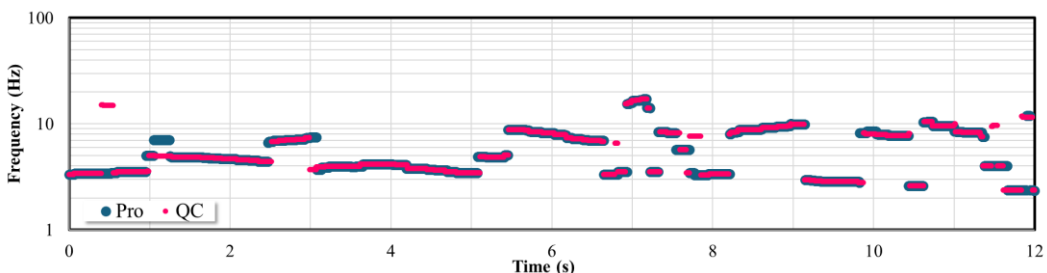


図-16 1.0Hz~30.0Hz の卓越振動数時間変化

表-4 全計測の卓越振動数一致度算定結果

計測地点	方向成分	センサ名称	比率 (%)	方向成分	センサ名称	比率 (%)	方向成分	センサ名称	比率 (%)
①	X	QC	74.6	Y	QC	73.7	Z	QC	69.2
		LP1	76.6		LP1	81.4		LP1	70.4
		LP2	68.2		LP2	78.9		LP2	58.9
		MEMS	0.2		MEMS	1.0		MEMS	1.0
②	X	QC	86.1	Y	QC	78.9	Z	QC	69.7
		LP1	79.2		LP1	73.7		LP1	62.4
		LP2	83.8		LP2	73.5		LP2	65.0
		MEMS	0.1		MEMS	0.0		MEMS	0.1

表-5 卓越振動数一致度の最大値, 最小値, 平均値

センサ名称	比率最大値 (%)	比率最小値 (%)	比率平均値 (%)
QC	86.1	69.2	75.4
LP1	81.4	62.4	73.9
LP2	83.8	58.9	71.4
MEMS	1.0	0.0	0.4

### 3.4 伝達関数評価

LP1 と LP2 を用いて落石危険度振動調査<sup>3)</sup>を実施する場合は、2つのセンサの伝達関数による評価となるため、LP1 と LP2 の同一地点同時計測によって得られたデータの伝達関数を求め、その値が 1.0 近傍となる振動数範囲を探る適用性判定を実施した。これまで、センサ単体で精度が保証される振動数は 20~30Hz 程度であったが、落石危険度振動調査の危険度判定基準は 30Hz であり、伝達関数とすることで危険度判定基準以上の振動数評価が可能であるかを確認する。伝達関数算定ではフーリエ振幅スペクトルで除することでゼロ割現象による不安定さを解消する意味合いで、フーリエ振幅スペクトルにハニング法による平滑化を 50 サイクル施してから伝達関数を求めた。なお、平滑化 50 サイクルは、伝達関数算定時に良く用いられる一般的なレベルであり、過度な振幅調整ではないと言える。図-17 に計測地点①の伝達関数を示し、図-18 に計測地点②の伝達関数を示す。この結果から伝達関数が 2.0 以下の範囲は 60.0Hz 程度であり、現場応答が 2.0 以上の増幅が見込めれば、この範囲での伝達関数活用が可能と考え、落石危険度振動調査への展開も可能と言える。

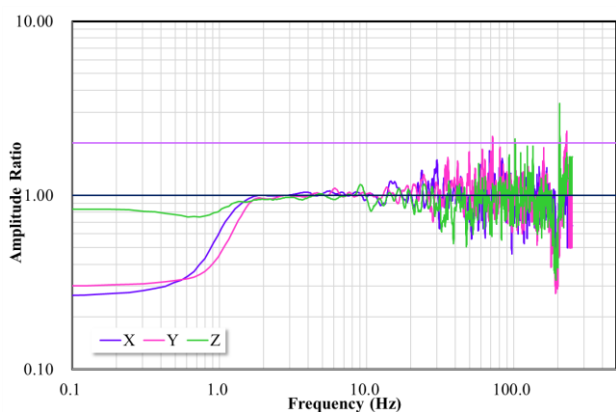


図-17 計測地点①での伝達関数(平滑化 50 サイクル)

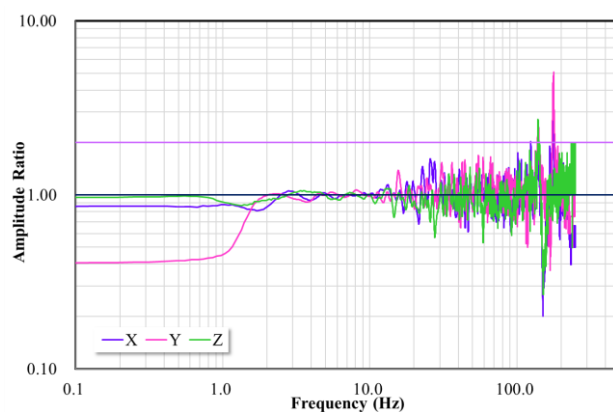


図-18 計測地点②での伝達関数(平滑化 50 サイクル)

## 4. まとめ

本研究は、種々の加速度センサを用いて、地盤常時微動計測への適用性を検討した。そのために、高性能クォーツ加速度計を評価基準値としてクォーツ加速度計、MEMS 加速度計での同時計測を実施し、RMS 値、フーリエ振幅スペクトルおよび非定常振幅スペクトルを用いた分析によって評価を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- ① RMS 値は、MEMS 以外は概ね同程度の値を示した。

- ② クォーツ加速度計は、フーリエ振幅スペクトルとその比、非定常振幅スペクトルからの卓越振動数時刻歴評価によると 1Hz～30Hz 程度が地盤常時微動計測に利用可能な範囲である。
- ③ ノイズ密度が 20～25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  程度の MEMS 加速度計は地盤常時微動計測に適していない。
- ④ クォーツ加速度計で伝達関数評価を行う場合には、現場の増幅応答レベルが 2 倍以上であれば 60Hz 程度まで利用できる。

**謝辞**：本研究を実施するにあたり、ソナス株式会社のご協力を得ました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1)中村真貴, 原田隆典, 王宏沢, 斎藤将司: 常時微動 H/V スペクトル比を利用した強震観測点近傍の地震動推定法, 土木学会論文集 A1,Vol.65,No.1, PPI\_65-74, 2009.
- 2)遠藤大輔, 上田稔, 橋詰正広, 永坂英明, 葛巻亜弥子: 常時微動 H/V スペクトルの卓越振動数と S 波検層結果および N 値から換算した S 波速度構造から算出した固有振動数の比較, 第 39 回地盤工学研究発表会, PP.2021-2022, 2004.
- 3)伊藤雅基, 小嶋啓介: 常時微動観測に基づく盛土造成地の地盤構造の推定に関する事例研究, 自然災害科学 J.JSNDS 38-3, PP.389-405, 2019.
- 4)緒方健治, 松山裕幸, 天野浄行: 振動特性を利用した落石危険度の判定, 土木学会論文集 No.749/VI-61, PP.123-135, 2003.
- 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, 土木学会論文集 A1,Vol.75,No.4, PPI\_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,Vol.76,No.4, PPI\_793-I\_803, 2020.
- 7)ソナス (株): 構造物モニタリング向け無線式振動計測システム Sonas X04 シリーズ, PP.1-5, 2025.
- 8) (株) ロジカルプロダクト: パンフレット「老朽化インフラ対策で寿命 100 年を目指します。», PP.1-2, 2025.
- 9)小出陽菜, 吉川高広, 沢田和秀, 赤沢健, 森本翔太郎: 落石危険度振動調査法への 3 成分小型加速度センサの適用, 第 37 回中部地盤工学シンポジウム, PP.20-26, 2025.
- 10)神山真: 強地震動の非定常スペクトル特性とその波動論的考察, 土木学会論文報告集 Vol.284, PP.35-48, 1979.