

# 未固定スマートフォンの地震観測活用に向けた 震度推定手法の開発

青木 雅嗣\*<sup>1</sup>・山本 優\*<sup>1</sup>

Keywords : unanchored smartphone, MEMS sensor, seismic observation system, estimation of seismic intensity, shaking table test  
未固定スマートフォン, MEMS センサー, 地震観測, 計測震度推定, 振動台実験

## 1. はじめに

多くの人が所有するスマートフォン端末には MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) センサーが搭載されており、加速度、角速度、磁気、気圧など、端末の状態を常時モニタリングすることが可能である。これらを地震計として活用することは、高密度地震観測ネットワークの構築につながる。既往の研究<sup>例えば 1),2)</sup>においても、その活用を目指し、性能確認や様々な状況を想定した振動台実験が実施されている。スマートフォンは、机の上など水平面に置かれている状態、あるいは持ち歩いている状態など、固定されていない状態（未固定）がほとんどである。未固定の場合、地震時にはスマートフォンが滑ったり跳ねたりするため、計測された揺れのデータから設置面の揺れを正確に把握できない。また、揺れを正確に知るために固定すると、スマートフォンの利便性が低下するという課題がある。これまでにスマートフォンを地震計として活用しようとする検討は多くあるが、買い替え等により不要となったものを固定して使用方法が主となっている<sup>1)</sup>。

本報告では、使用中のスマートフォンにおいても地震の揺れのデータが取得できるようにするため、3軸振動台実験を実施し、固定されていないスマートフォンの加速度データから固定された地震計の震度を推定する手法を開発した。

## 2. 振動台実験

### 2.1 計測アプリの作成

振動台実験に先立ち、MEMS センサーから得られるデータを保存するための計測アプリを作成した。同様

の MEMS センサー計測アプリは数多く公開されている。しかし、表示機能だけのものや、データ出力は可能であるがサンプリング周波数が設定できないもの、加速度以外のデータが出力できないもの、時刻によるトリガーが設定できないものなど、振動台実験での使用に適したものは少ない。本アプリでは、測定 ID やサンプリング周波数、計測時間を設定できる仕様とした。加速度センサー以外にもジャイロセンサー・磁気センサーのデータも抽出できる仕様とした。作成したアプリの画面を、図-1 に示す。

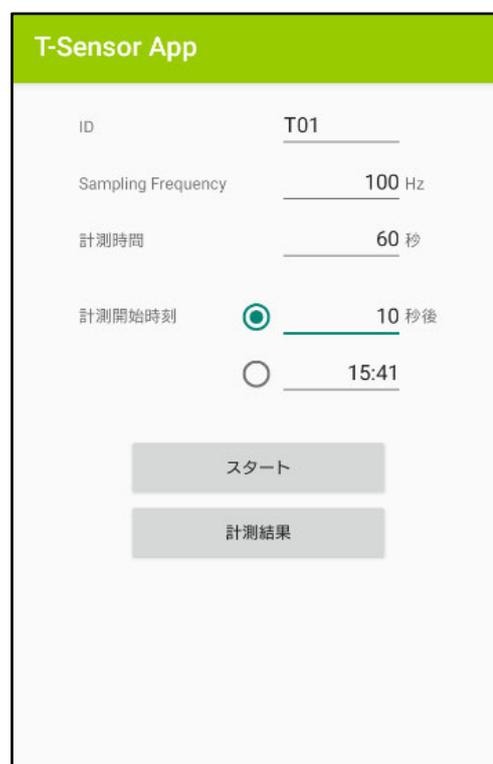


図-1 作成した計測アプリ

Fig.1 Developed data logger App for MEMS sensors

## 2.2 振動台実験

3軸振動台上に机を載せ、その上に設置状態や計測アプリの異なるスマートフォンを設置し、3軸振動台実験を実施した(写真-1)。オフィスでの使用を想定し、振動台の上にタイルカーペットを敷き、その上にOAデスクを設置した。各スマートフォンの設置状態および使用した計測アプリの一覧を、表-1に示す。

測定は100Hzサンプリングで実施した。前節で作成したアプリを用いるスマートフォンでは、加速度、角速度、磁束密度を計測した。比較用に公開されている別の計測アプリによるもの、設置状態の異なるものも設置しているが、本報告では、主に②の未固定スマートフォンについて計測震度推定方法を適用した結果を報告する。なお、⑬の地震計(加速度計)は、レファレンスとなる机上の揺れを計測するために併設している。

加振波として用いた観測記録の一覧を、表-2に示す。短周期が卓越しているもの、パルス波を伴うものを中心に選定した。水平成分の振幅が大きい方に対し、表-2の設定加速度欄に示した値に基準化を行った。

2022/1/22 日立波(設定加速度 800cm/s<sup>2</sup>)の加振後の

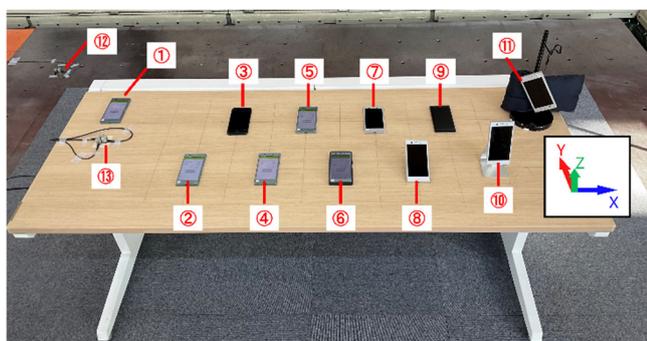


写真-1 3軸振動台実験で使ったスマートフォン  
Photo.1 Smartphones for shaking table tests

様子を写真-2に示す。上下動を伴う大加速度により、スマートフォンの大きな滑動や机上でのバウンド、机からの落下が見られた。

## 3. 計測震度の推定方法の開発

### 3.1 推定の流れ

机の上に置いたスマートフォンが地震動を受けた時に考えられる挙動は、固定、滑動、バウンド、落下の4つが考えられる。滑動、バウンド、落下は図-2に示すような状態で、本報告ではこれらのいずれかが生じた場合、移動したと表現する。スマートフォンが移動することで、固定された地震計とは異なる加速度が計測される。スマートフォンが移動すると回転も伴うため、スマートフォンの向きも変わる。そこで、3成分合成に基づく指標である計測震度に着目した。計測震度の算出には、3成分を合成した加速度値を使用するため、向きの変化に対しては大きな影響を及ぼさないことが考えられる。スマートフォンから得られた加速度波形を適切に補正することで、固定した地震計と同等の計測震度を推定する。

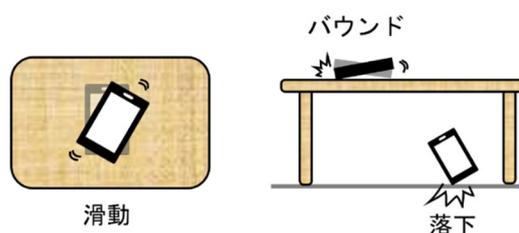


図-2 スマートフォンの状態判別(滑動・バウンド・落下)のイメージ

Fig.2 Diagram of smartphone's state which is SLIP, BOUNCE and FALL

表-1 3軸振動台実験で使ったスマートフォンの設定  
Table.1 Settings of smartphones for shaking table tests

番号	コード	機種	計測アプリ	計測対象	設置状態
①	T01	Android SO-02K	T-Sensor App	加速度, 角速度, 磁束密度	両面テープで固定
②	T02	Android SO-02K	T-Sensor App	加速度, 角速度, 磁束密度	未固定, カバー無
③	I01	iPhone	アプリA	加速度	未固定, カバー無
④	T03	Android SO-02K	T-Sensor App	加速度, 角速度, 磁束密度	未固定, カバー無ケーブル付
⑤	T04	Android SO-02K	T-Sensor App	加速度, 角速度, 磁束密度	未固定, カバー①
⑥	T05	Android SO-02K	T-Sensor App	加速度, 角速度, 磁束密度	未固定, カバー②
⑦	P01	Android SO-02K	アプリB	加速度	未固定, カバー無
⑧	T07	Android SO-02K	T-Sensor App	加速度, 角速度, 磁束密度	未固定, スマホリング
⑨	C01	Android SO-02K	アプリC	加速度	未固定, カバー無
⑩	T08	Android SO-02K	T-Sensor App	加速度, 角速度, 磁束密度	未固定, 立てかけ
⑪	T09	Android SO-02K	T-Sensor App	加速度, 角速度, 磁束密度	未固定, ぶら下げ
⑫	S01	2G地震計(振動台上)	—	加速度	固定
⑬	S02	5G地震計(机上)	—	加速度	固定

3.1.1 計測記録波形と機器固有のノイズの補正

各スマートフォンの MEMS センサーが適切な加速度データを記録するかを確認するため、最も揺れの小さい 2005/8/16 築館波(100 cm/s<sup>2</sup>)を用いて検証した。

築館波(100 cm/s<sup>2</sup>)の加振により得られた 5 端末の計測記録を、図-3 に示す。X 方向、Y 方向については、ほぼ同等のフーリエ振幅を示しているのに対し、Z 方向は Android 端末において、レファレンス地震計から大きく乖離した記録が得られた。一方、iPhone 端末においては、3 方向ともにレファレンス地震計と同等の記録が得られた。端末の設置状態や計測アプリに関わらず、Android 端末で異なる記録が得られていることから、Android 端末における上下方向の観測でのセンサーやアプリの仕様の違いが原因と考えられる。

本検討では、Android 端末の Z 方向に関しては、iPhone 端末で得られた加速度データを基に補正を実施し、Android 端末でレファレンス地震計と同等の記録が得られたと仮定した上で震度推定を実施した。

機器固有のノイズの補正については、他の端末でのデータが必要となるため、実施適用する際には予め機器ごとに補正方法を決めるなどの対策が必要となる。

表-2 加振波一覧

Table.2 List of excitatioin waves

発生日時	発生場所	M	観測点	設定加速度[cm/s <sup>2</sup> ]
2005/8/16	宮城県沖	7.2	MYG004築館	100, 200, 400, 1000
2022/1/22	日向灘	6.6	MYGH15日向	200, 400, 1000
2011/3/11	3.11地震	9.0	IBR003日立	400, 600, 800, 1000
2016/4/14	熊本(前震)	6.5	KMM006熊本	400, 1000
2008/6/14	岩手・宮城内陸	7.2	IWTH26一関東	400, 600
1995/1/17	兵庫県南部	7.3	神戸海洋気象台	400, 800



写真-2 2011/3/11 日立波(800 cm/s<sup>2</sup>)の加振後の様子  
Photo.2 The appearance after shaking of the Hitachi wave (800 cm/s<sup>2</sup>) on March 11, 2011

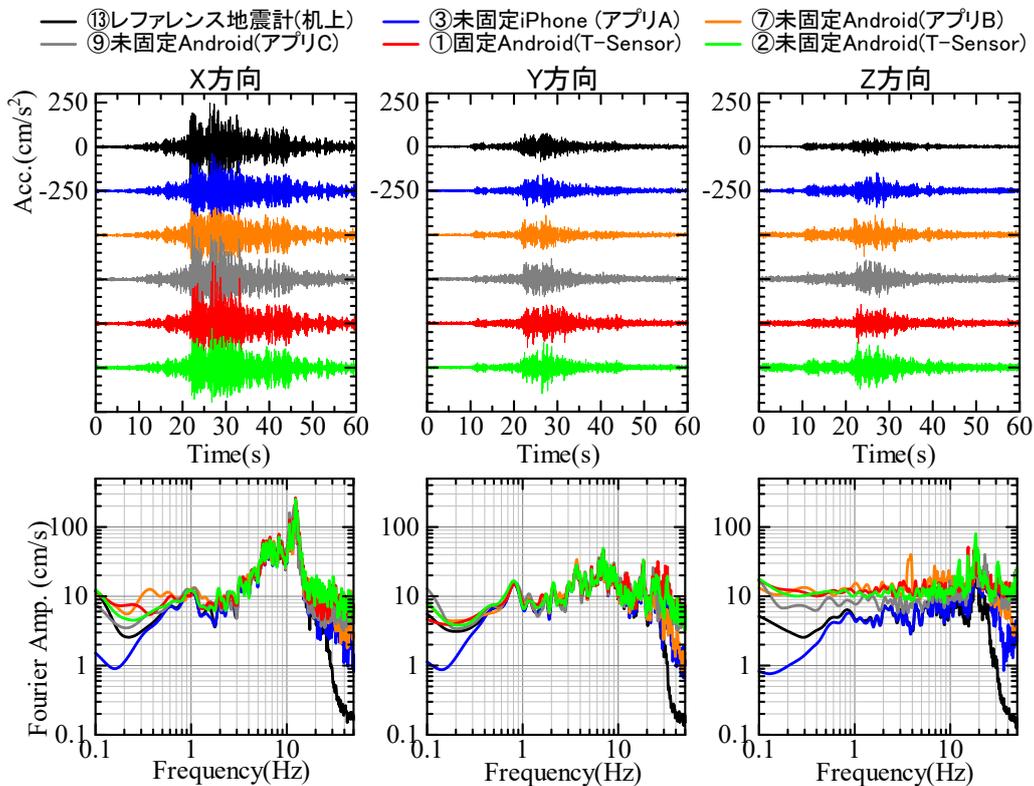


図-3 2005/8/16 築館波(100m/s<sup>2</sup>)の加振により得られたスマートフォンの計測波形の比較  
Fig.3 Comparison of smartphones data obtained by shaking of the Tsukidate wave on August 16, 2005

### 3.1.2 磁気センサーによる移動区間判定

スマートフォンの磁気センサーは地磁気を検出するために使われるもので、電子コンパス等、方位の検出に使用される。したがって、滑動に伴う回転、上下動に伴うバウンド等、スマートフォンの移動に伴い、磁束密度の相対変化が明瞭に検出できる。磁束密度の相対変化のイメージを、図-4 に示す。スマートフォンが移動により姿勢が変化した場合、地磁気ベクトルは変化しないため各方向が受ける磁束密度が変化する。なお、磁束密度の絶対値を使用する場合、別途校正が必要になるため、本報告では相対的な変化のみに着目することとした。具体的な判定方法を以下に示す。

現在時刻が $t$ の時、 $t - W_B$ から $t$ までの $W_B$ 秒間のタイムウィンドウをとり、その区間での不偏標準偏差 $\sigma B_t$ を算出する。 $\sigma B_t$ が閾値 $\tau_{\sigma B}$ を超える区間が、磁束密度の相対変化が大きいため、移動区間と判定する。事前に設定すべきパラメータは $W_B$ 、 $\tau_{\sigma B}$ である。本報告では、加振実験の結果を踏まえ、 $W_B = 1(s)$ 、 $\tau_{\sigma B} = 0.5(\mu T)$ と設定した。判定イメージを、図-5 に示す。

水平方向の磁束密度の標準偏差が $\tau_{\sigma B}$ を超えた場合は滑動、上下方向の磁束密度の標準偏差が $\tau_{\sigma B}$ を超えた場合はバウンドもしくは落下が発生したと判断する。

### 3.1.3 加速度波形の補正

前節の方法でスマートフォンの状態を判定し、それに伴った加速度波形の補正を実施する。

#### (1) 滑動時の補正

滑動が発生した場合、摩擦力以上の加速度が加わらない状態となり、時刻歴波形が一定の加速度で頭打ちになるような波形となる。このとき、頭打ちの加速度 $A_{sat}$ は、一般的に静止摩擦係数と重力加速度の積で表される<sup>3)</sup>。静止摩擦係数は、スマートフォンのカバーや机の素材の組合せにより変化するため、実験等によりあらかじめ把握して設定する必要がある。もしくは頭打ち加速度を精度よく判定する工夫が必要である。

滑動時の加速度記録の補正方法のイメージを、図-6 に示す。赤線がスマートフォンに記録される加速度データ、青線が実際の加速度を示している。加速度が頭打ちする前後 2 点ずつの加速度記録を用いて、サイン波によるカーブフィッティングを行う。フィッティングには、非線形最小二乗法を用いる。なお、この補正は水平成分を対象に実施する。

また、滑動とバウンドが同時に生じている場合、傾いた状態で机や台の平面に衝突することがある。そのとき、スマートフォンの X・Y 方向にも、衝突による大きい加速度が記録される。したがって、滑動と判定

された波形でも、 $A_{sat}$ より大きい加速度が計測されることがある。その場合は $A_{sat}$ 以上の加速度データを $A_{sat}$ とみなして補正を行うこととした。

3軸振動台実験で得られたスマートフォンの加速度波形を補正した例として、2005/8/16 宮城県沖の地震 MYG004 築館(400cm/s<sup>2</sup>)の入力に対し、②の未固定スマートフォンで計測した波形(青線)と補正波形(赤線)を、図-7 に示す。補正する前の計測波には、滑動に伴う加速度の頭打ちが発生していることが分かる。概ね 100cm/s<sup>2</sup>程度で頭打ちとなっていることから、本

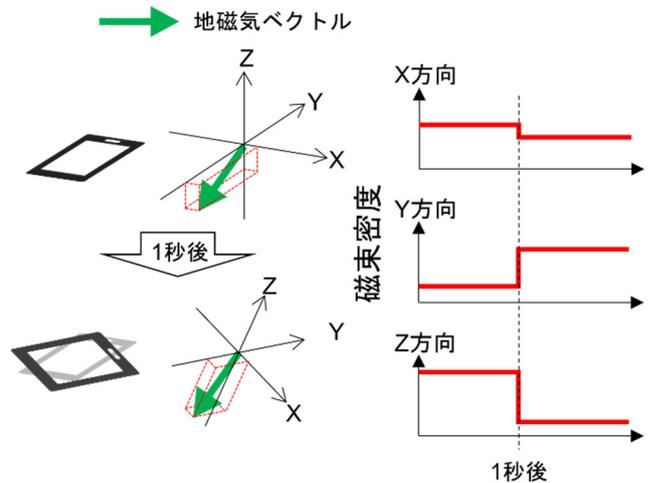


図-4 磁束密度の相対変化のイメージ  
Fig.4 Diagram of the relative change in magnetic flux density

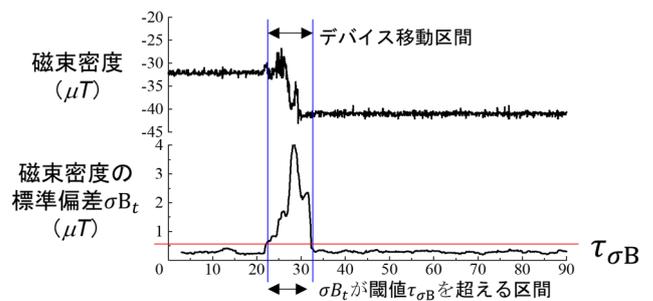


図-5 移動区間判定のイメージ  
Fig.5 Diagram of movement judgement of a device

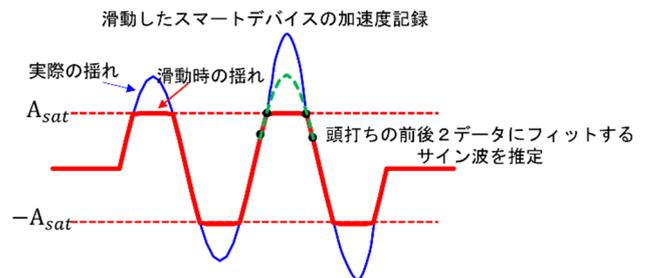


図-6 滑動時加速度データ補正方法のイメージ  
Fig.6 Diagram of the device sliding correction method

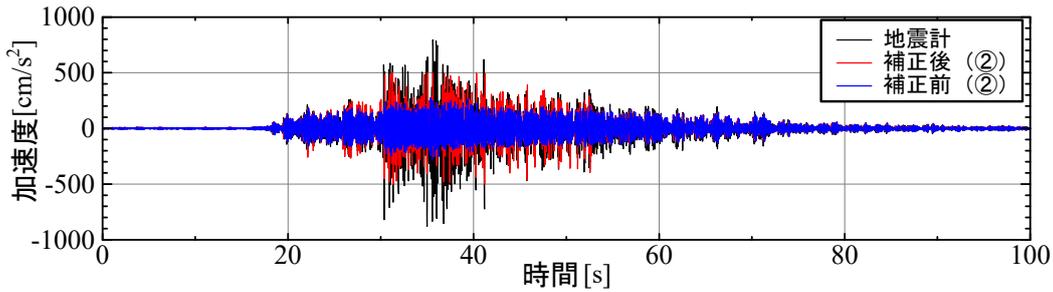


図-7 滑動による加速度波形補正の例 (2005/8/16 築館波 400 cm/s<sup>2</sup>入力 NS方向)

Fig.7 An example of accelogram correction of a slipping smartphone ( shaking wave: Tsukidate wave 400 cm/s<sup>2</sup> NS)

実験における机とスマートフォンの摩擦係数は0.1程度であったと考えられる。また、加速度記録の補正により、地震計の加速度波形に近づいていることが確認できる。以上を踏まえ、本報告においては②のスマートフォンに対し、 $A_{sat}$ を100(cm/s<sup>2</sup>)と設定した。

なお、⑤・⑥の未固定スマートフォン(カバー有)においては、頭打ち加速度が300cm/s<sup>2</sup>程度であった。摩擦係数は0.3程度であり、カバー無しの場合より滑りにくくなっているため、カバーを付けることで設置面の加速度を得やすくなることが考えられる。

(2) バウンド・落下時の補正

バウンドまたは落下が発生した場合は、スマートフォンと机・床とが衝突し、非常に大きな加速度が加わることが考えられる。また、バウンド・落下中は、スマートフォンが空中に浮いた状態でもある。空中では、スマートフォンに重力以外の力は加わらないため、設置場所の加速度を適切に反映していないことが考えられる。

上記の特徴を踏まえ、計測震度計算に用いる加速度に反映するか否かを判定する。磁気センサーにより判定した上下方向の移動区間中は、バウンドまたは落下が生じていると考えられる。この区間の中で、バウンドと落下のどちらの状態であるかを、3成分合成加速度を基に判定する。ここでは、閾値 $\tau_{Impact}$ を設定し、閾値を超える場合は落下、閾値を超えない場合をバウンドと判定することとした。バウンド状態の時は、Z方向が特に大きい加速度となり、水平方向はある程度参考になる加速度が記録されていると考えられる。このことから、バウンド中はZ方向だけを考慮しないこととした。また、落下状態の時は、3方向とも参考にならないと考えられるため、全方向を考慮しないこととした。これらの判定と加速度考慮区間のイメージを、図-8に示す。

閾値 $\tau_{Impact}$ は、3軸振動台実験の結果から判断した。固定設置している地震計と②および③のスマートフォ

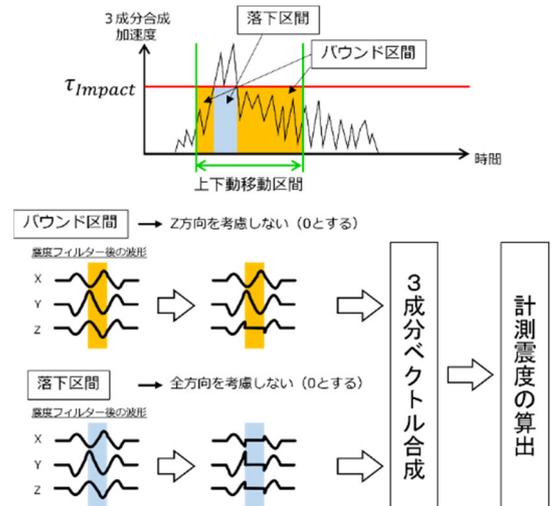


図-8 バウンド・落下状態の判定と加速度考慮区間のイメージ

Fig.8 Diagram of the judgement of BOUNCE and FALL state and the acceleration consideration sector

ンの3成分合成の最大加速度の比較図を、図-9に示す。横軸が地震計の最大加速度、縦軸がスマートフォンの最大加速度を示す。両者は2G以上において大きく乖離することから、2G程度から衝撃の影響が強くなっていることが考えられる。従って本報告では、閾値 $\tau_{Impact}$ を2Gと設定した。

3.1.4 震度計算

以上の判定並びに補正を施した3成分の加速度波形から、気象庁の方法<sup>4)</sup>に従い、計測震度を計算した。

なお、地震計で得られた加速度は入力加速度よりも大きい、机の振動に伴う影響であると考えられる。ただし、大きな上下動によりバウンドを伴うと、スマートフォンが机から離れるため、正常な滑動波形が得られなかった。このような場合の処理は、今後の課題である。

3.2 震度推定結果

震度推定結果を、図-10に示す。横軸が、机上の地震計による計測震度、縦軸がスマートフォンで計測した地震動から得た計測震度である。黄色の網掛けにプロ

ットされれば地震計とスマートフォンで同じ震度階となっていることを示す。補正前の計測震度は概ね地震計の計測震度を過小評価しているケースが多い。よって、本実験の範囲ではスマートフォンの滑動による影響が大きかった可能性がある。バウンド、落下に伴う大加速度に関しては、震度に影響する周波数(図-11)より高い周波数のため、計測震度に与える影響が小さかった可能性がある。

補正前と比較して補正後による計測震度の精度が改善されていることがわかる。ただし、計測震度値でみると推定精度にはばらつきがあり、波形の状態に応じた推定手法の改良も進めたい。

#### 4. まとめ

未固定スマートフォンの利活用を目的に、スマートフォンの3軸振動台実験を実施し、スマートフォンの状態に応じた補正を施し、震度推定に関する手法を開発し、その有効性を示した。しかし、計測震度のばらつきは大きいため、機器固有のノイズの除去方法の開発やバウンドを伴う滑動の補正処理方法の開発を実施し、推定手法のさらなる精度向上が望まれる。

#### 謝辞

加振波は、防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net のデータを使用させて頂きました。アプリの作成には株式会社アーク情報システムにご協力頂きました。記して感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 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), 構造 II, pp.209-210, 2018.
- 2) 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), 情報システム技術, pp.5-6, 2016.
- 3) 横山恭男: 静摩擦係数に及ぼす振動の影響(第1報) — 3軸方向の振動の影響 —, 精密機械, 32 巻, 6 号, pp.25-30, 1966.
- 4) 気象庁: 計測震度の算出方法, [https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc\\_sinsi.html](https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sinsi.html), (参照 2023/6/15) .

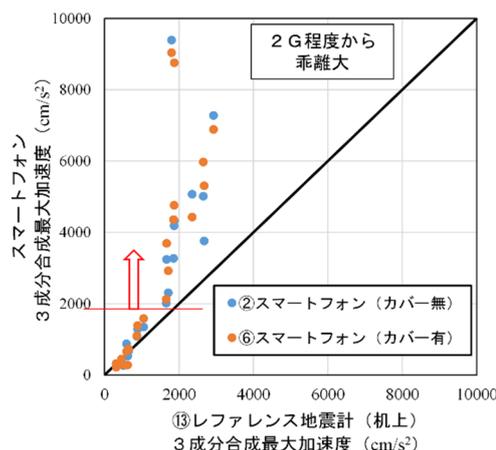


図-9 3成分合成最大加速度の比較  
Fig.9 Comparison of the maximum acceleration of the three component vector sum

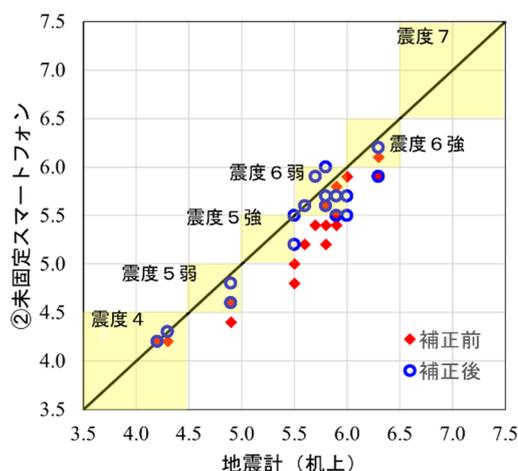


図-10 未固定スマートフォンの震度推定結果  
Fig.10 Estimation of seismic intensity from an unanchored smartphone

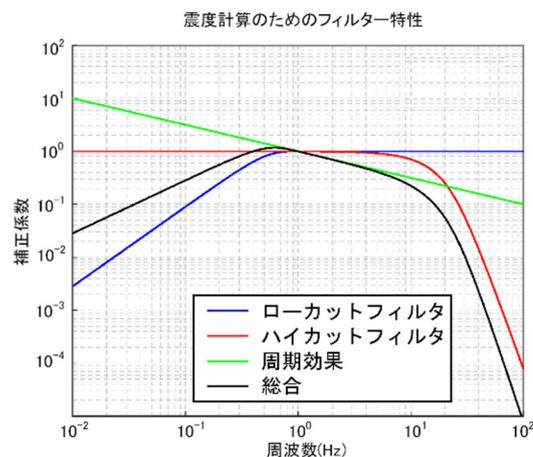


図-11 計測震度算出時に施すフィルター特性 (気象庁 HP<sup>4)</sup> より引用)  
Fig.11 Filter characteristics for seismic intensity (quoted from the JMA website<sup>4)</sup> )

\* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室