

1年間の観測地震波を用いた家具転倒防止器具の 転倒防止効果に関する検証

田近 義宏*，眞田 良仁***，佐藤 良行**，中西 智宏**

概 要

地震時の家具類の転倒・落下・移動防止対策について、家具転倒防止器具を使用した対策が講じられており、それらの防止器具について、現在まで東京消防庁では様々な検証よりその有効性を確認してきた。しかし、これらの実験は正弦波や兵庫県南部地震などの特定の地震動により実験したものがほとんどであり、複数回の地震動により生じる防止器具の変化については検証されていない。そこで、東京都内で1年間に観測された地震動や2018年4月に発生した熊本地震等の揺れを振動発生装置で再現することにより、年間を通して不定期に発生する地震動や連続で発生する強い揺れに対しての防止器具の転倒防止効果について解明することを目的として検証を行った。

その結果、防止器具の設置条件や地震動の特性等の条件によっては、地震によりポール式の転倒防止器具の設置状態が変化し、次の地震により防止器具が脱落する恐れがあることがわかった。

1 はじめに

家具類の転倒・落下・移動防止対策（以下、「家具転防止」という）については、防止器具を使用した対策が講じられている。それらの防止器具について、平成18年に当庁が発表した「オフィス家具・家電製品の転倒・落下防止対策に関する調査研究委員会における検討結果」において、様々な家具での転倒防止効果の有効性について記されており、それをもとに、「家具類の転倒・落下・移動防止対策ハンドブック」が作成された。その中には、地震に対する家具類への対策や、地震動に対する防止器具の効果が示されている。しかし、阪神・淡路大震災の実績によると、固定方法等の不備により、対策実施済みの家具類の約23%で実施効果がなかったとされている¹⁾。また、令和4年5月に改訂された「首都直下地震等による東京の被害想定」によると、こうした実施効果のない家具転防止の割合を10%まで低下させ、さらに家具転防止の実施率を57.3%（令和2年）から75%に上昇させることで、死者・重傷者数を約40%減少させることができるとされている¹⁾。このように、首都直下地震等の巨大地震に対して室内における被害を低減させるためには、「適切な」家具転防止の実施が不可欠である。

現在まで、正弦波²⁾や兵庫県南部地震など特定の地震動による防止器具の転倒防止効果³⁾については知見があるものの、複数回発生する地震動に対しての防止器具の転倒

防止効果の維持や防止器具の力学的な挙動について、その知見は明らかとなっていない。

そこで、東京都内で発生した1年間の地震動などを振動発生装置で再現することにより、複数回発生する地震動に対し、防止器具の転倒防止効果の維持や振動による挙動について確認するとともに、地震動における負傷者数の低減を図ることを目的として検証を行った。

2 方法

(1) 振動発生装置

本検証で使用した当庁保有の振動発生装置の外観は図1、諸元性能は表1のとおりである。振動発生装置は、永久磁石方式による3次元振動台により、過去の地震波を含めさまざまな振動を再現することができる装置である。



図1 振動発生装置

表1 振動発生装置の諸元性能

項目	諸元・性能
加振方向	水平2方向 (XY軸) 垂直1方向 (Z軸)
振動台寸法	2,500mm×2,500mm
最大搭載質量	10,000 kg
最大変位 (peak to peak)	X軸: 600 mm Y軸: 400 mm Z軸: 150 mm
駆動方式	永久磁石駆動方式 動電型

(2) 室内模型

図2のとおり、室内空間を再現した模型を振動発生装置上に固定した。室内模型の構造、内装及び寸法は表2のとおりである。模型内には表3に示す本棚を設置した。危険側の条件を設定するため、本棚上部におもりとして紙の束を計44kg 収納し、重心位置が高くなるように調整した。3軸加速度計を室内模型床と本棚上部に取り付け、それぞれの応答加速度を測定した。

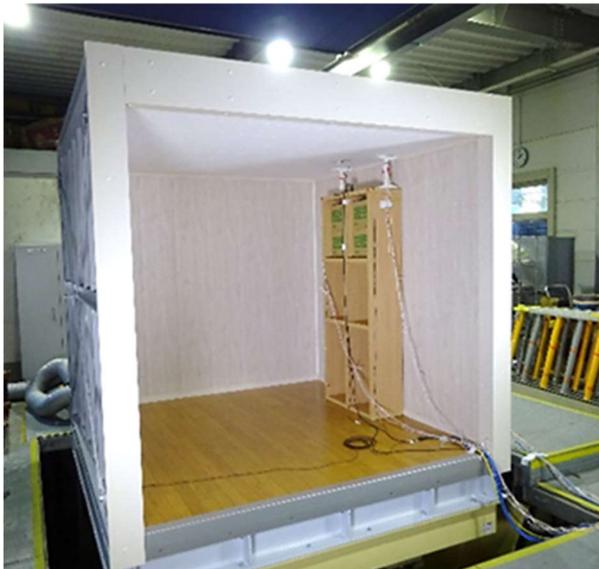


図2 室内模型外観

表2 室内模型の構造・寸法

項目	諸元
躯体	H型鋼ボルト止め構造
内装	床 : 合板 12 mm + フローリング 12 mm
	壁 : 合板 12 mm + パネル材 3 mm
	天井 : 合板 12 mm + パネル材 8 mm
寸法	幅 : 外寸 2,500 mm 内寸 2,280 mm
	奥行 : 外寸 2,500 mm 内寸 2,390 mm
	高さ : 外寸 2,600 mm 内寸 2,050 mm
質量	1,900 kg

表3 本棚の諸元

項目	諸元
寸法 (mm)	300×1270×75
質量 (mm)	(内容物なし) 20 kg
	(おもり収納時) 64 kg
重心位置 (mm)	(内容物なし) 900 mm
	(おもり収納時) 1,313 mm

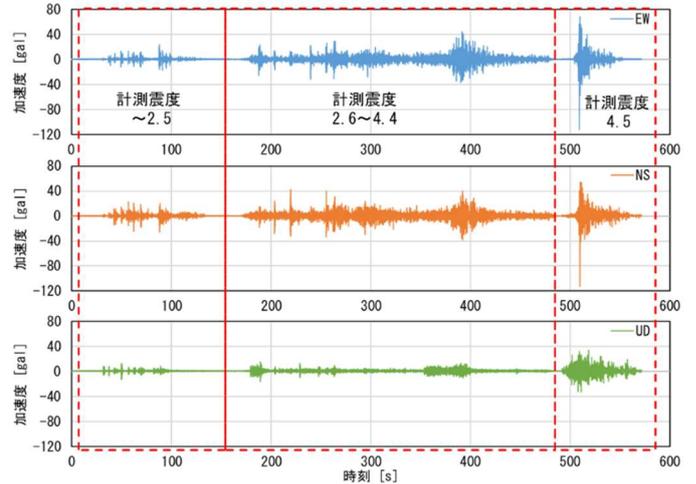


図3 2021年中に東京都内(島しょ部を除く)で観測した計測震度0.5以上の地震動(最小加速度4.9 gal以上)

表4 2021年中に東京都内(島しょ部を除く)で観測した地震動の震度、回数、最大加速度

震度(回数)	震度1 (36回)
	震度2 (17回)
	震度3 (10回)
	震度4 (1回)
	震度5弱 (1回)
最大加速度	東西方向 (X軸) : 113 gal
	南北方向 (Y軸) : 112 gal
	上下方向 (Z軸) : 34 gal
	3軸合成 : 72 gal

(3) 加振波

国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網(K-net/KiK-net)から地震波形⁴⁾を引用し、振動発生装置で再現した。

ア 2021年中に都内で観測された地震を計測震度順に連結した地震波

1年間を通じて発生する地震に対する防止器具の効果を確認するため、2021年1月1日から同年12月31日までに島しょ部を除く東京都内で観測された計測震度0.5以上の地震を、計測震度が小さい順に並び替えて連結した加振波を作成した。本振動発生装置で再現できる加速度の最小値が5gal程度であるため、本検証では作成した地震波の内4.9gal以上の加速度成分を含む地震動を連結して、図3に示す加振波を作成し実験を行った。本加振波の詳細

は表4のとおりである。振動発生装置には東西方向(EW)をX軸に、南北方向(NS)をY軸に、上下方向(UD)をZ軸に入力した。

イ 2018年4月熊本地震

実際に観測された、連続する震度7級の地震に対するポール式防止器具の効果を確認するため、2018年4月14日及び16日のK-net 益城波をもとに、加振波を作成した。以後、14日の加振波を前震、16日の加振波を本震とする。前震にあつては、振動発生装置の性能を考慮し、垂直方向を90%に減じている。前震及び本震の詳細は表5のとおりである。

表5 2018年4月14日、16日熊本地震K-net 益城波(前震:垂直方向90%)の計測震度と最大加速度

	前震	本震
計測震度	6.6 (震度7)	6.7 (震度7)
最大加速度		
東西方向(X軸)	915 gal	1,134 gal
南北方向(Y軸)	744 gal	648 gal
上下方向(Z軸)	1,174 gal	840 gal
3軸合成	1,368 gal	1,327 gal

(4) 防止器具

ア ポール式防止器具

本検証に用いたポール式防止器具を図4に示す。支柱部分は金属製であり、天井や什器等に接する脚の部分は樹脂製である。なお、本棚に向かって右側のポール式防止器具をA1、左側のものをA2とする。

イ ひずみゲージ

本検証では、ポール式防止器具の突っ張り力を測定するために、図5のように支柱部分の塗装をはがし、金属部分を露出させ4か所にひずみゲージを貼り付けた。

データロガーのサンプリングレートは50 Hzである。



図4 ポール式防止器具



図5 ひずみゲージの貼付け

ウ 校正試験

ひずみゲージで測定したひずみを突っ張り力に変換するために、引張圧縮試験機により校正試験を行った。試験

体であるポール式防止器具を固定された治具間に挿入し、0.5 mm/sのストロークで圧縮を実施した。各ポール式防止器具について、5回実験を実施した。

エ 締付トルクの測定

図6のように突っ張り力を調整するためのねじ部分のトルクを測定した。本検証では表6のように2種類の締付トルクで検証を行った。



図6 突っ張り力調整ねじの締付のトルク測定

表6 突っ張り力調節ねじの締付トルク

締付力	トルク
強	2.1~3.1 N・m
弱	2.0 N・m以下

3 結果

(1) ポール式防止器具の突っ張り力とひずみの関係

図7にポール式防止器具に加えた圧縮力と4枚のひずみゲージで測定したひずみの絶対値の平均値を示す。

図7の各試験に回帰直線を引くと、切片の値が各試験で大きく異なるが、傾きはA1が0.132(標準誤差 4.0×10^{-3})、A2が0.134(標準誤差 2.6×10^{-2})であった。このことから、試験力が0Nのとき、ひずみが0になると仮定した際の校正式は式1のとおりとする。以下では、式1を使用する。

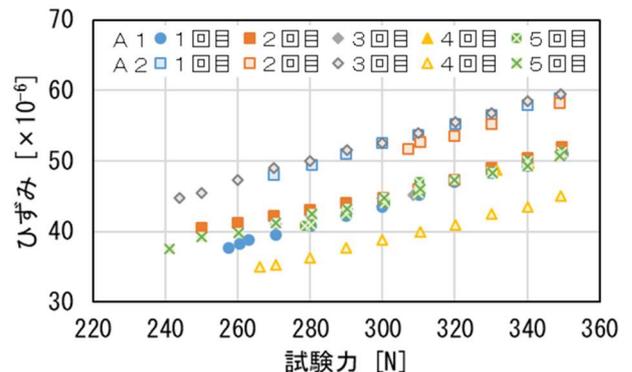


図7 ポール式防止器具の校正試験結果

$$F = \frac{\sum |\varepsilon_n| / n}{0.13} \dots \text{式1}$$

$$\left(\begin{array}{l} n: \text{ひずみゲージの枚数} \\ F: \text{突っ張り力 [N]} \quad \varepsilon_n: \text{ひずみ} [\times 10^{-6}] \end{array} \right)$$

(2) 突っ張り力の時間変化

ポール式防止器具を本棚と室内模型の天井の間に設定し、約150分間ひずみゲージで突っ張り力を測定した結果を図8に示す。

両器具の突っ張り力は設定時をピークに急激に低下した。150分後における突っ張り力の1分間変化率を見ると、A1は0.00 N/min、A2は-0.38 N/minであり、突っ張り力の減少が非常に小さくなった。このことから、以後の実験ではポール式防止器具を設定してから150分経過してから実験を実施した。

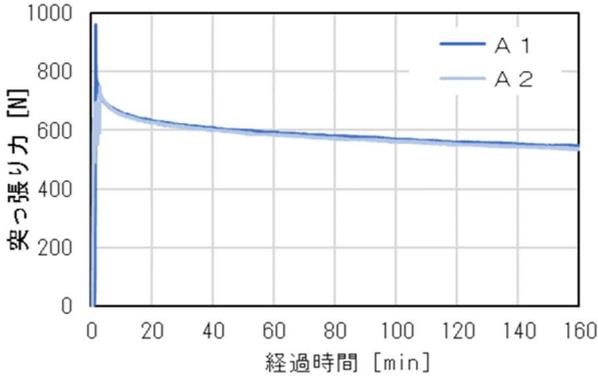


図8 突っ張り力の時間変化

(3) 2021年中に都内で観測された地震に対する実験結果
ア 突っ張り力の加振前後の変動

図9に各防止器具の加振による突っ張り力の変化の一例を示す。本棚の動揺に合わせて突っ張り力が変化し、最大加速度付近で突っ張り力が最大となった。特にA1の防止器具では、加振前の突っ張り力である175 N付近を中心にして突っ張り力が振動していたが、最大突っ張り力を記録したのち、振動の中心が200 Nに増加した。

図10に左右の防止器具の突っ張り力を合計した総突っ張り力の変化を示す。すべての実験において、1回目の加振後の変化が一番大きく、以降の変化は1回目と比較し小さかった。

図11には、張り付けたひずみゲージの位置についてまとめたものを、図12には、各締付力におけるひずみの絶対値の変化量の平均値を示す。締付力強におけるA1 (CH1~4)のひずみを見ると、CH2のひずみの変化が大きく、加振後に本棚右側方向に変形していることがわかる。締付弱におけるA2 (CH5~8)のひずみを見ると、CH5とCH8の変化が大きく、本棚左手前方向に変形していることがわかる。

イ 本棚の加速度と変位の時間変化

図13から図15に各実験における本棚の各軸の最大加速度を示す。強1及び強3について見ると、X軸方向の最大加速度は1回目と比較して2回目でそれぞれ増加し、Y軸方向の最大加速度は減少している。弱1を見ると、Y軸方向の加速度は加振をするごとに増加している。

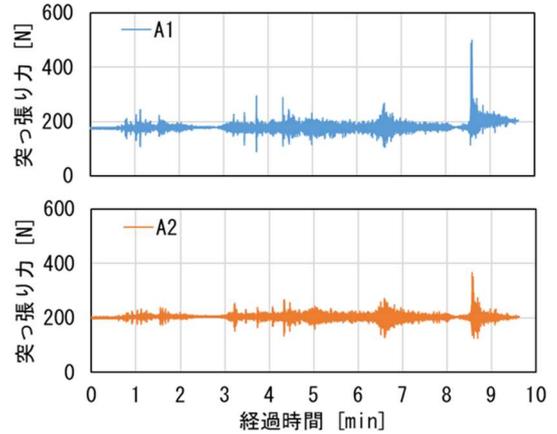


図9 加振による突っ張り力の変動

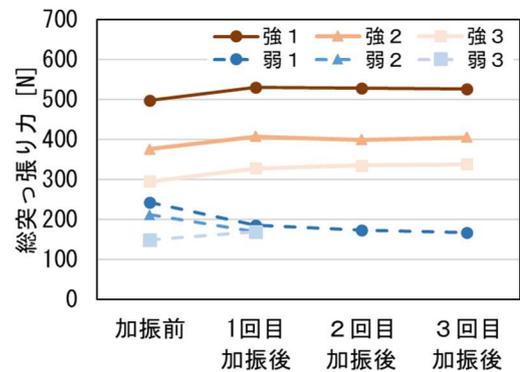


図10 総突っ張り力の変化

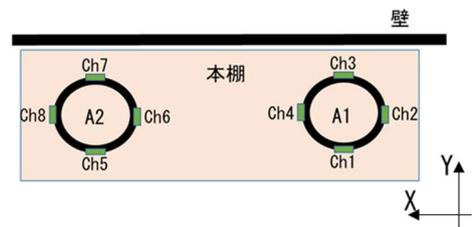


図11 ひずみゲージ各CHの貼り付け位置

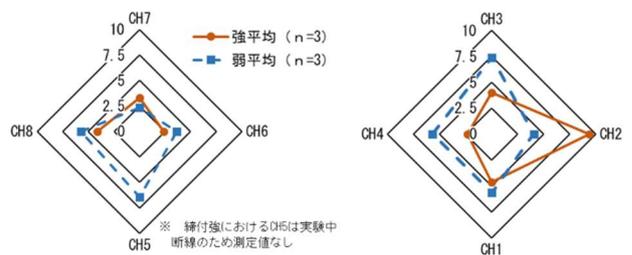


図12 各ひずみの絶対値の変化量 (×10⁻⁶)

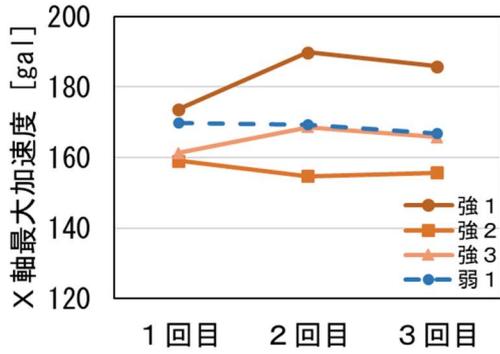


図13 各加振におけるX軸方向の最大加速度

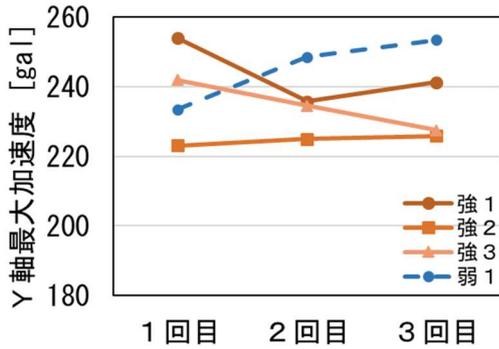


図14 各加振におけるY軸方向の最大加速度

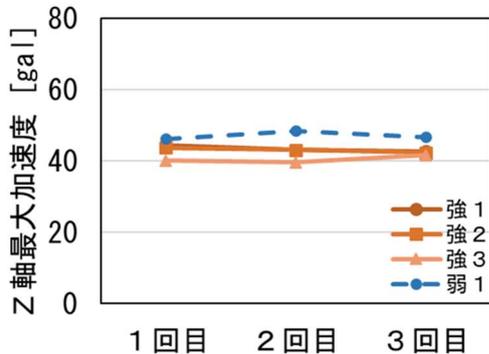


図15 各加振におけるZ軸方向の最大加速度

ウ 総突っ張り力の差と最大加速度の差

n回目の加振の加振前後の突っ張り力の差を ΔT 、n回目の加振における最大加速度に対するn+1回目の最大加速度の差を $\Delta \alpha$ とする。

図16に各 ΔT に対する各軸の $\Delta \alpha$ をプロットした散布図を示す。総突っ張り力の差と各軸の最大加速度の差の相関係数はX軸について0.46で正の相関が、Y軸、Z軸についてそれぞれ-0.76、-0.63で強い負の相関が認められた。すなわち、総突っ張り力が増加すると、X軸について最大加速度が増加し、Y軸及びZ軸について最大加速度が減少するといった傾向が見られた。

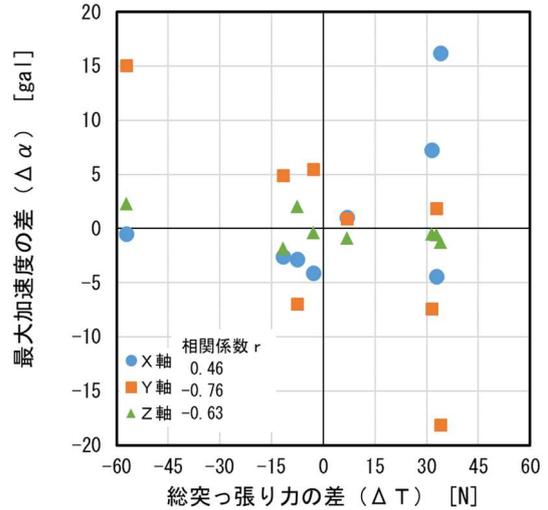


図16 総突っ張り力の差と各軸最大加速度の差の結果

(4) 2018年4月熊本地震に対する実験結果

図17に前震及び本震について、ポール式防止器具の締付力を変えて、加振を行った結果を示す。締付力が弱い場合、前震において、本棚がX軸方向に滑動し、防止器具がX軸方向に傾き、左側の防止器具下部が本棚から外れ脱落した。締付力が強い場合も本棚はX軸方向に滑動し、防止器具がX軸方向に傾いたが、脱落までには至らなかった。前震加振後、防止器具の点検を行わずに本震を加振すると、前進と同様に本棚はX軸方向に滑動し、両防止器具が脱落した。



図17 熊本地震における防止器具の挙動

4 考察

(1) 締付力の強さ

図10の結果から、締付力が弱いと震度5弱程度の揺れで突っ張り力が減少する場合あることが確認された。また、熊本地震前震の結果から締付力の差によって、防止器具の脱落の有無が確認できた。このことから、今回用いた防止器具の説明書にもあるように、締付力を適切な強さで設定しない場合、防止器具本来の性能が発揮でないことが分かった。

(2) 防止器具の加振による変化と防止器具脱落のメカニズムについて

2021年に都内で観測された地震波では防止器具に目視による明らかな変化は認められなかったが、ひずみゲージと加速度計による計測の結果から、以下のことが分かった。
結果① 震度5弱の最大加速度110gal程度の水平方向の揺れで、防止器具の突っ張り力に変化が生じる(図10及び図12参照)。

結果② 突っ張り力が増加すると、X軸方向の最大加速度は増加し、Y軸及びZ軸の加速度は減少する(図16参照)。また、熊本地震の実験結果から以下のことが分かった。

結果③ 防止器具の脱落はX軸方向に倒れることで発生する(図17参照)。

以上のことから、防止器具が脱落するメカニズムを以下のように考える。

ア 防止器具の締付が弱いと防止器具が斜めに傾いた状態で固定される場合がある。

イ 強い揺れで防止器具がX軸方向に歪むことで突っ張り力が上がる(図18参照)。締付が弱い場合この揺れで歪みが直り、突っ張り力が低下することがある(弱1及び弱2)。

ウ 突っ張り力が上がることで、本棚のY軸及びZ軸方向の揺れに対して固定する力が増加し、Y軸及びZ軸の加速度は小さくなるが、斜めに歪んでいることで、X軸方向への揺れに対しては固定する力が弱まり、X軸方向の加速度が増加する(図19参照)。

エ 上記のような状態で大きな揺れが発生すると、本棚がX軸方向に大きく滑動し、防止器具が倒れ脱落する。

以上の考察から、防止器具はY軸方向(本棚の前後の方向)に固定する力は十分にあるが、X軸方向(本棚の左右の方向)に固定する力は加振により低下する恐れがあるため、震度5弱程度以上の地震があった後は、改めて防止器具を設定し直す等の点検を行う必要がある。

なお、今回用いた防止器具の取扱説明書には、地震の後には点検する旨が記載されている。

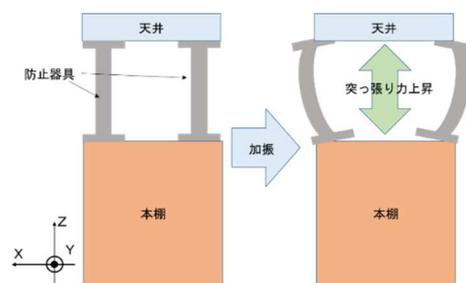


図18 加振による防止器具の歪み

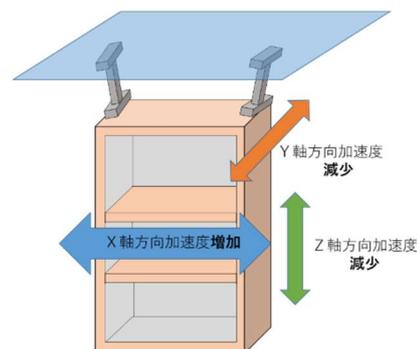


図19 各軸の最大加速度の変化

5 まとめ

本検証では、ポール式防止器具に様々な地震波を連続して加振して、その挙動についてのデータを収集・分析した。その結果、以下の2点について明らかとなった。

- (1) ポール式防止器具の締め付けは、強く締め付けないと適切な効果を得られない。
- (2) 条件によっては、震度5弱程度の揺れでも、ポール式防止器具に、家具の転倒につながる変化が生じる可能性があるため、震度5弱程度以上の地震の後には防止器具を付け直す等の点検を行う必要がある。

6 謝辞

工学院大学建築学部久田教授から、貴重なご意見を頂いたことをここに深く感謝申し上げます。

また、本研究では防災科学技術研究所の強震観測網(K-net/Kik-net)から地震波形のデータを引用しました。

[参考文献]

- 1) 東京都防災会議 首都直下地震等による東京の被害想定報告書 p.7-2 2022年
- 2) 東京消防庁消防技術安全所報 52号 長周期地震動等に伴う室内安全に関する検証(その1) 2014年
- 3) 東京消防庁家具類の転倒・落下防止対策推進委員会 家具類の転倒・落下・防止対策推進委員会における検討結果 2005年
- 4) 国立研究開発法人防災科学技術研究所:NIED K-NET, KiK-net、<https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>、(参照 2022-10-01)