

切り紙構造の力学応答を活かした用途展開への期待

ー防災・減災分野を意識しながらー

奈良県立奈良高等学校 仲野 純章
龍谷大学 松浦 哲郎

1. はじめに ー日本古来の文化・切り紙ー

江戸時代に庶民の間で楽しまれた遊びの一つに切り紙というものがある。紙を折ってはさみで切ると様々な図柄ができあがる「紋切り⁽¹⁾」や、紙を折らずに図柄を切り出す「切り絵⁽²⁾」、あるいは、上下左右対象に規則的な切れ込みが入れられ、引き伸ばすと網目状の模様が現れる「網⁽³⁾」など、様々な種類がある。このうち、本稿では「網」に見られる切れ込みの形態を特に「切り紙構造」と呼ぶ。切り紙構造は、切れ込みの入れ方次第では、引き伸ばすと変形しながら大きく伸びることから、意匠的な用途で多く見られる。七夕飾りはその典型例であるが、この他にも、例えば、宮城県では意匠を凝らした切り紙細工を屋内の神棚を始めとした信仰対象に飾る習慣が残る⁽⁴⁾など、現代でも生活文化の中に溶け込んでいる（図1）。

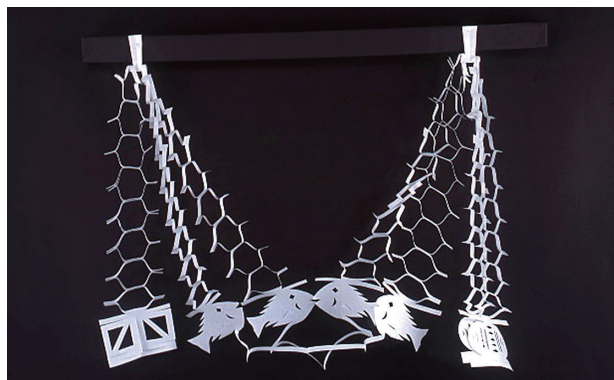


図1 宮城県で見られる「信仰の切り紙」
（東北歴史博物館所蔵）

一方、切り紙構造の新たな活用事例も見られるようになりつつある。例えば、切り紙構造に荷重がかかると形状に変化が現れることを直接的に活かして簡易型重量センサーとして応用することや、ひずみゲージを具備させて重量計とすることなどが検討されている⁽⁵⁾。また、近年は、海外での活用検討事例も報告されている。米国ミシガン大学では、太陽電池分野への応用が検討されている⁽⁶⁾。太陽の動きに合わせて太陽電池を変位させる手段としては、架台に太陽電池を搭載して太陽を追尾する方法が一般的であるが、彼らは切り紙構造を有する太陽電池を形成し、太陽の動きに合わせて引っ張ることで、太陽光を受けやすい傾きを生じさせるシステムを提案している。また、英国ブリストル大学では、一枚のシートが様々な形状に変化し、それに伴い幅広い機械的性能を発揮する人工材料（メタマテリアル⁽⁷⁾）の開発に絡めた検討がなされている。すなわち、当該人工材料に切り紙構造を備えさせることで、様々な三次元形状を容易に作り出せるようになることに着目し、一般的な駆動機構を使って、ナノロボット、航空宇宙技術、スマートアンテナなどへの応用が考えられている⁽⁸⁾。こうした例に見るように、切り紙構造活用の動きは国内外問わず、徐々に広がりを見せつつある。なお、切り紙構造に類似したものとして、輸送時の衝撃から果物やガラス瓶などを保護する緩衝材や伸縮性が求められる布生地などに見られる「メッシュ構造^{(9) - (11)}」がある。メッシュ構造は、後述するような切り紙構造特有の変形挙動ではなく、比較的連続的で単調な変形挙動を示すこと

から、本稿における切り紙構造とは区別する。

切り紙構造は、切れ込みデザインに関連する変数が複数あり、変形挙動も複雑である。そのため、細工手法そのものは古くから公知であるものの、「切れ込みデザイン」と「変形」についての詳細な関係については、定量的に十分議論・解明されていないのが実態である⁽¹²⁾。だからこそ、未だに開拓されていない用途展開先も残されていることが期待される。以下、切り紙構造が示す力学応答の特徴を見ていくとともに、筆者らが関心を抱いている分野の一つである地震災害を想定した防災・減災分野に言及しながら、新たな用途展開の開拓を呼びかけたい。

2. 切り紙構造の力学応答特性

2.1 力学応答特性の基本的特徴

本稿では、簡単のため、図2に示すような最小単位の切れ込みデザインを有する最も単純な切り紙構造（以下、「シングル構造」という。）を元に議論を進める。

このシングル構造では、試験片は中心周り5箇所（図2）の切れ込みで構成される上下左右対称となる切れ込みデザインを有し、各切れ込みは試験片の長手方向に対して垂直に形成されるものとする。ここで、図2に示すように、各切れ込みに関連する変数として d , h , w をおく。このような切り紙構造を長手方向に引っ張ったときの変形挙動は、大きく二段階構成となる⁽¹³⁾。第一段階は、平面的な変形が起こる過

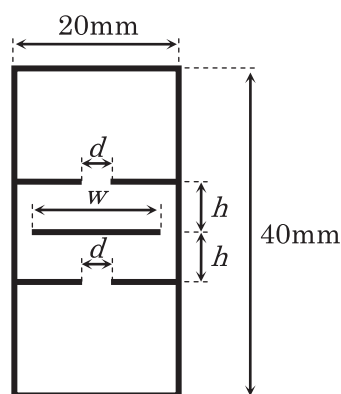


図2 切り紙構造を有する試験片正面図（シングル構造）

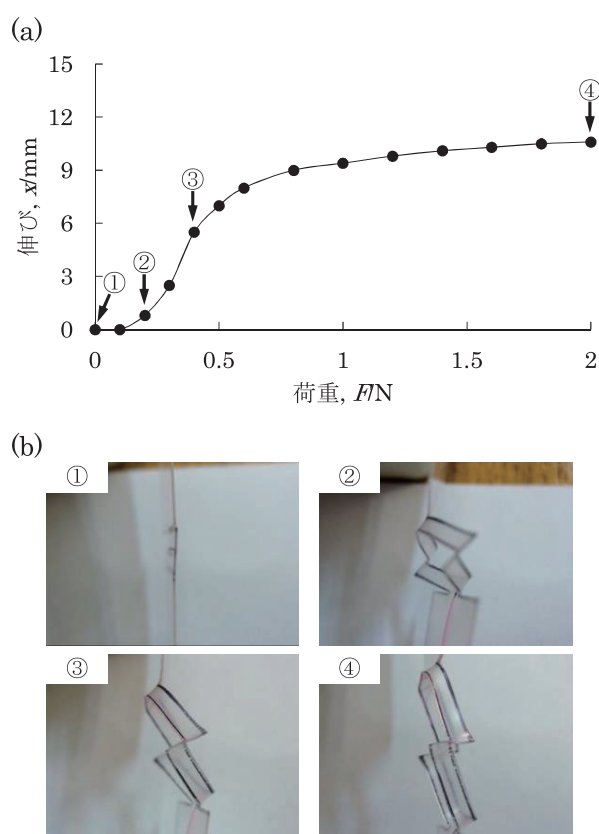


図3 $(d, h, w) = (4, 2, 18)$ デザインの試験片が示す力学応答; (a) 力学応答曲線, (b) 力学応答曲線上の各点における試験片形状

程である。この変形は、いわば金属材料における比例限度内での微視的な弾性変形⁽¹⁴⁾に似ており、伸びの程度も小さい。続く第二段階は、平面的な変形から立体的な変形に移行して以降の変形過程である。第二段階の変形過程に移行した場合、伸びの程度は急激に大きくなる。図3(a)は、 $(d, h, w) = (4, 2, 18)$ デザインの厚さ0.18mmのポリプロピレン製試験片が示す力学応答曲線である。また、図3(b)には、図3(a)の力学応答曲線上の各点における試験片形状を示す。

このように、シート状材料に単純な切れ込みデザインを付与することで、二段階構成の変形挙動が容易に得られることが分かる。なお、切れ込みデザインやシート材料次第では第二段階に移行しない場合も考えられる。

2.2 切れ込みデザインの違いによる力学応答特性の違い

図3(a)で、 $(d, h, w) = (4, 2, 18)$ デザインの厚さ

0.18mmのポリプロピレン製試験片が示す力学応答曲線を示したが、同じ素材で切れ込みデザインが異なる場合、力学応答曲線がどのようなになるか見ていきたい。図4に、 $(d, h, w)=(4, 2, 18)$ デザインの力学応答曲線と比較する形で、 $(d, h, w)=(4, 5, 18)$ デザインの力学応答曲線を示す。

図4から分かるように、 h を大きくさせることで、第二段階に移行する転移点を高荷重側にシフトさせることができる。同様に、図5や図6に示すように、 d や w を変化させることで転移点を操作することも可能である。

ただし、図4から図6で明らかなように、 d, h, w を変化させることで転移点の位置を操作できる一方、伸びの程度も付随して変化する。これは、各切れ込みデザインでの最大伸び量の大小が関連していると思われる。図2の切り紙構造（シングル構造）の場合、初期状態の側面図は図7(a)のようであるが、伸び量が最大値となる際、近似的に図7(b)の形状に至っていると考えることができる。

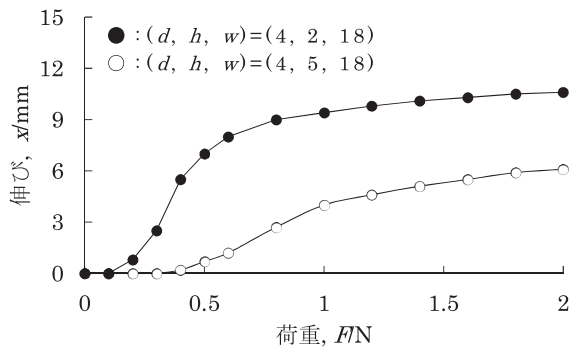


図4 $(d, h, w) = (4, 2, 18), (4, 5, 18)$ デザインの各試験片が示す力学応答の比較

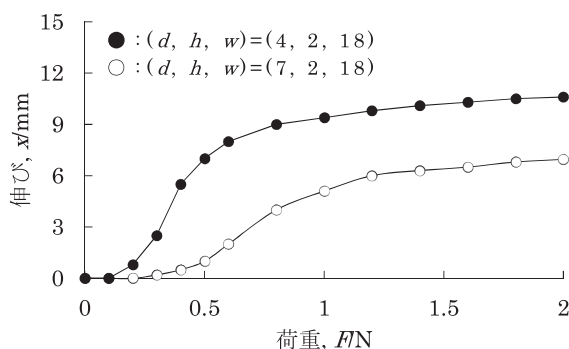


図5 $(d, h, w) = (4, 2, 18), (7, 2, 18)$ デザインの各試験片が示す力学応答の比較

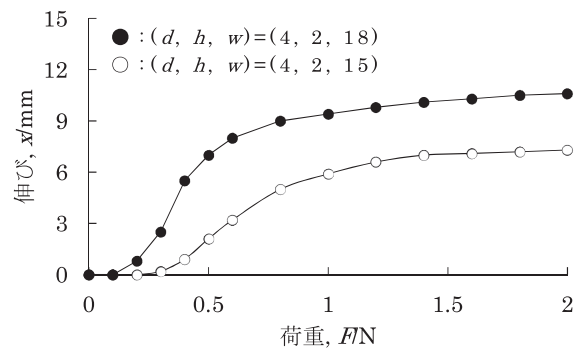


図6 $(d, h, w) = (4, 2, 18), (4, 2, 15)$ デザインの各試験片が示す力学応答の比較

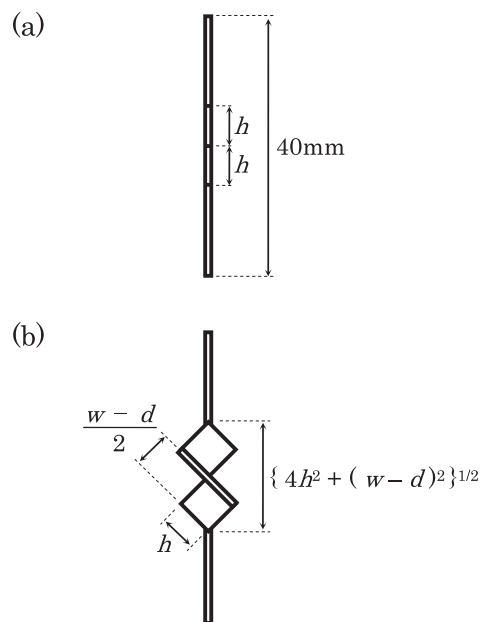


図7 シングル構造の切り紙構造側面図; (a) 初期状態, (b) 最大伸び量に至った状態

このことから、最大伸び量 $x_{\max}$ は式(1)で示される。

$$x_{\max} = \{4h^2 + (w-d)^2\}^{1/2} - 2h \quad (1)$$

式(1)より、 d が小さいほど、また、 w が大きいほど最大伸び量 $x_{\max}$ が大きくなることは明らかである。また、 d, w が固定された場合の一例として $d=4, w=18$ を代入すると、式(1)は、式(2)のようになる。

$$x_{\max} = (4h^2 + 196)^{1/2} - 2h \quad (2)$$

これをグラフ表示すると図8のようになり、やはり h が小さいほど最大伸び量 $x_{\max}$ が大きくなることが確かめられる。

以上のことから、 d 、 h 、 w を変化させて転移点进行操作すると、それに伴って、必然的に伸びの程度も変化することが理解できる。

転移点进行操作しながら、なおかつ、伸びの程度も操作するには、切り紙構造の繰り返し回数を増減する手段が簡便である。例えば、図4で示したように、 $(d, h, w) = (4, 2, 18)$ デザインに対して、 $(4, 5, 18)$ デザインの転移点は高荷重側にシフトする一方、伸びの程度は鈍化する。転移点は $(d, h, w) = (4, 5, 18)$ デザイン水準の高荷重側を狙い、一方で、伸びの程度は $(d, h, w) = (4, 2, 18)$ デザイン水準を狙うには、図9のように、切り紙構造をもう一組多く繰り返した構造（以下、「ダブル構造」という。）にすればよい。

図10に、シングル構造、及びダブル構造を有する $(d, h, w) = (4, 5, 18)$ デザインの各試験片が示す力学

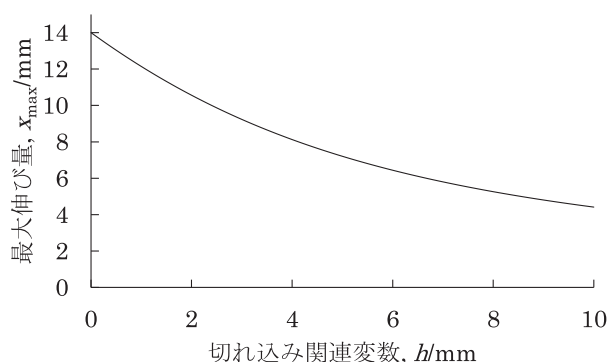


図8 $(d, h, w) = (4, h, 18)$ デザインの試験片における h と最大伸び量 $x_{\max}$ の関係

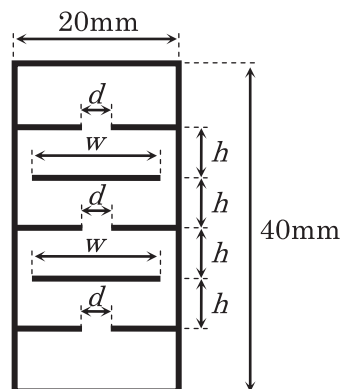


図9 切り紙構造を有する試験片正面図（ダブル構造）

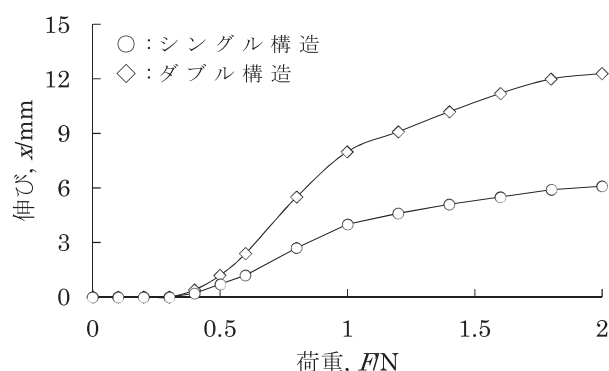


図10 シングル構造、及びダブル構造を有する $(d, h, w) = (4, 5, 18)$ デザインの各試験片が示す力学応答の比較

学応答の比較を示す。シングル構造に対して、ダブル構造にすることで転移点を維持したまま、伸びの程度を倍増させられることが確認できる。

今回、ポリプロピレン製試験片でのデータを提示したが、金属等の他材料からなる試験片でも、基本的には同一変形挙動に基づく同様の力学応答特性を示すであろう。

3. 切り紙構造の新たな用途展開に向けて

切り紙構造の新たな活用事例が国内外で検討されつつあることは冒頭に述べたとおりであるが、シート状というシンプルな形態でありながら、二段階構成の変形挙動に基づく非線形の力学応答特性を示す切り紙構造には、他にも多くの用途展開先の可能性が潜在することが期待される。そうした可能性の一つとして、筆者らは地震に対する防災・減災用途という切り口の可能性に着目している。

3.1 「非構造部材による被災」に対する手立ての必要性

気象庁の発表によると、2016年度に日本国内で発生した震度1以上の地震は6587回にのぼる⁽¹⁵⁾。このような地震大国・日本において、戦後の地震政策は「崩壊しない構造体づくり」に焦点が当てられてきた。その結果、先の東日本大震災においても、昭和56年以降の「新耐震基準」に基づいて設計された建築物の躯体被害が少なかったといわれる⁽¹⁶⁾。

しかしながら、「構造体」の被災対策と比較して、

家具や機器、外装材といった多種多様な「非構造部材」の被災対策は遅れているといわざるを得ない。平成に入って初めての大震災である阪神・淡路大震災では、負傷原因の第3位に「重いものの落下」が挙げられた⁽¹⁷⁾。また、東日本大震災でも同様の課題が浮き彫りになった。例えば、図11に、東日本大震災発生当日、仙台市消防局によって救急搬送された傷病者の「地震・津波に起因する事由別内訳⁽¹⁸⁾」を示すが、その6割が屋内外の非構造部材の転倒・落下に関連したものであることがわかる。南海トラフ地震を始めとする大型地震の発生が今後予想されている⁽¹⁹⁾状況下において、こうした「非構造部材による被災」に対する手立ては、喫緊の課題であるといえる。

もちろん、「非構造部材による被災」に対しての手立てがなされていないわけではない。例えば家具の転倒防止であれば、L字金具、固定ベルト、突っ張り棒等により強度ある構造部へ固定することや、床面の間に耐震ジェルマットを挟むなどの手段が推奨されている。ところが、非構造部材は家具の他にも多種多様であり、こうした手段が適さない場面も多いであろう。九州大学では、「地震による非構造部材・実験機器等の転倒・落下防止対策に向けて」という、屋内外の各所で講じるべき転倒・落下策を整理したマニュアルを作成している⁽²⁰⁾が、こうしたマニュアルからも非構造部材に対する対策の多様性が再確認できる。転倒・落下防止対策は、現状「後付け」対策することが一般的であるが、本来であれば、非構造部材ごとに対策が事前組み込みされているか、少なくとも「後付け」対策を事前考慮して設計されていることが望ましい。

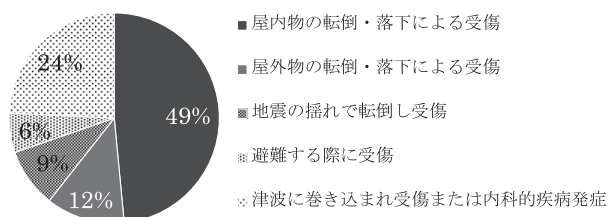


図11 東日本大震災発生当日に仙台市消防局に救急搬送された傷病者の地震・津波に起因する事由別内訳

3.2 切り紙構造の適用可能性とその利点

多種多様な非構造部材がある中、それぞれの非構造部材ごとに、デザイン面・技術面・原価面を考慮した適切な転倒・落下防止策があるはずであろう。そのための技術シーズの一つとして、筆者らは切り紙構造のポテンシャルに着目している。すなわち、図3(a)で示したような二段階構成の変形挙動に基づく非線形の力学応答特性を活かして、次のような機能が求められる部品に応用できないだろうか。

〔平常時〕一定の引張荷重範囲内では、形状を維持し非構造部材を連結・保持する部品として機能。

〔異常時〕大きな加速度を伴う地震により上記範囲を超えた荷重が突発的に加わった場合、破損せずに柔軟に伸縮し、連結部材の崩壊、そしてその後の転倒・落下という事態を回避。

上記用途を考えたとき、切り紙構造ならではの利点を再認識できる。

まず、サイズ面での利点である。例えば照明器具などの家電製品などで、元々組み込まれている部品に切り紙構造の加工を施すだけでよいならば、製品としての部品点数を増加させずに容易に機能を付与できよう。あるいは、仮に最低限の部品追加をせねばならないにしても、シート状材料の追加であれば、製品全体に対するサイズ面の影響度は少ない。

次に、特性面での利点である。切り紙構造はその伸縮挙動からばねと類似する側面が大いにある。そのため、ばねは上記用途に供せないのかという疑問が出よう。そもそも、ばねには様々な種類が存在し、その力学応答特性は、大別すると、線形・非線形の二種類に分類される。非線形のものは、さらに、伸縮挙動が連続的で、なだらかな非線形曲線を示すものと、切り紙構造同様に伸縮挙動が段階的で、不連続な非線形曲線を示すものがある。後者の力学応答特性を示す代表例としては、不等ピッチばねが挙げられる。不等ピッチばねは、一つのコイルばねに、ピッチが大きい部分と小さい部分が併存する形状のばねである。荷重がはたらくと、初めはピッチの小さい部分が大きく変形し、ピッチの大きい部分はあ

まり変形しないが、さらに荷重が加わり、ピッチの小さい部分の変形が収束すると、次にピッチの大きい部分の変形が起こる。すなわち、初段階は変形しやすいが、次段階は変形しにくくなるという力学応答特性を示す。同様の力学応答特性は、竹の子ばねやプログレッシブ重ね板ばねでも見られる⁽²¹⁾が、いずれにしても、全て圧縮荷重下での利用が前提であり、引張荷重を想定する上記用途には適用できない。仮に引張荷重でこうした力学応答特性に近い特性を求めたとしても、初めのうちは変形しにくく、荷重が増すと大きく変形する、という上記用途における要求特性と順序が逆転するため、やはり適用できない。つまり、ばねでは実現しがたい力学応答特性を切り紙構造では容易に実現できる。

4. おわりに

日本固有の文化の中で古くから親しまれてきた切り紙構造を、単なる意匠の用途としてではなく、現代的用途としてより積極的な活用が進めば新たな価値が生まれてこよう。今回、切り紙構造の特性を見ながら防災・減災の用途展開への一可能性にも触れたが、可能性のある用途展開先としてはこれに限らないと考えている。用途や素材、デザイン面で無限の組合せがある切り紙構造が多分野の技術者・技能者に注目され、様々な観点で現代的な用途にアレンジし、新たなイノベーションが起こることを期待したい。

謝辞

博物館所蔵品の写真をご提供頂きました東北歴史博物館に深く御礼を申し上げます。

<参考文献>

- (1) 佐善圭：岡崎女子短期大学研究紀要, 43(2010), 31-40.
- (2) 辻宏達：九州龍谷短期大学紀要, 48(2002), 47-57.
- (3) エキグチクニオ：和をあそぶ江戸の切り紙, 誠文堂新光社, (2008), 78-79.
- (4) 東北歴史博物館ホームページ (http://www.thm.pref.miyagi.jp/exhibition/detail.php?log&data_id=875).

- (5) 磯部翠, 武居淳, 奥村剛：特願2016-082472.
- (6) A. Lamoureux, K. Lee, M. Shlian, S. R. Forrest and M. Shtein : Nature Communications, 6(2015), 1-6.
- (7) 真田篤志：電子情報通信学会大会講演論文集, (2006), SS.38-SS.39.
- (8) R. M. Nevill, F. Scarpa and A. Pirrera : Sci. Rep. 6(2016), 31067.
- (9) 北津裕明, 石川豊, 中村宣貴, 路飛, 椎名武夫：日本食品保蔵科学会誌, 34(6) (2008), 331-336.
- (10) 杉山儀, 原田 真, 柴田佳孝：あいち産業科学技術総合センター研究報告, (2016), 152-155.
- (11) 松嶋秀士, 吉田博：土木学会年次学術講演会講演概要集, 64 (2009), 173-174.
- (12) 磯部翠, 奥村剛：日本物理学会誌, 72(5) (2017), 360-363.
- (13) 仲野純章：理科教育学研究, 58(3) (2018), in press.
- (14) 科学の実験編集部：先生と生徒のための物理実験, 共立出版, (1959), 50-51.
- (15) 気象庁：平成28年12月地震・火山月報（防災編）, (2016), 106-119.
- (16) 総務省消防庁：東日本大震災記録集, (2013), 86-90.
- (17) 国崎信江：地震から子どもを守る50の方法, ブロンズ新社, (2005), 20-21.
- (18) 高橋文雄：東日本大震災直後の被災地で, 近代消防社, (2016), 51-54.
- (19) 内閣府ホームページ (<http://www.bousai.go.jp/jishin/>).
- (20) 九州大学施設部施設管理課：地震による非構造部材・実験機器等の転倒・落下防止対策に向けて～未曾有の震災等に備えて～, (2012), 1-16.
- (21) 門田和雄：トコトンやさしいばねの本, 日刊工業新聞社, (2016), 58-73.