

ハニカム構造を応用した紙製品の開発

学校法人静岡理工科大学星陵高等学校

3年 上杉朋花

ハニカム構造を応用した紙製ヘルメットの開発

1 動機・目的

祖父の転倒事故をきっかけに、高齢者の安全な日常を守りたいと思い、ハニカム構造の特性を活かした「軽量で強度の高い紙製ヘルメット」を開発したいと考えた。消防庁の調査によると、高齢者の救急搬送者数は「転倒・転落」によるものが全体の8割を占めるとされている。高齢化が著しく進む日本において、高齢者の転倒事故による怪我の発生率を減少させることを目的として、紙製ヘルメットの開発に向けた研究に取り組んだ。

2 実験方法

ハニカムペーパーの単位体積当たりの衝撃エネルギー吸収量を求める為、落下衝撃試験を行った。落下試験機を図 1 に示す。3kgの鉄球を高さ 0.23m からハニカムペーパーに落下させ、変形した体積を計測した。ハニカムの形状を図 2 のように定義すると、ハニカムペーパーを広げることで θ は図 3 の様に増加する。 θ を変化させながら各条件に対して5回の落下実験を行い、単位体積当たりの衝撃エネルギー吸収量を求めた。

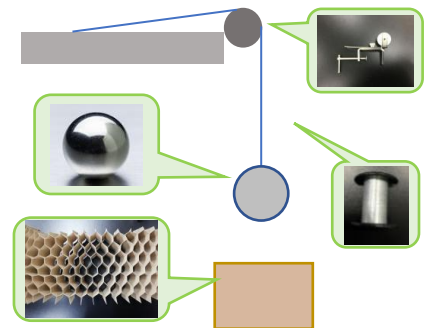


図 1 落下実験装置の概要

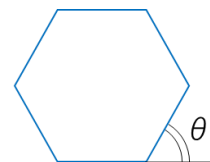


図 2 ハニカムの形状の定義

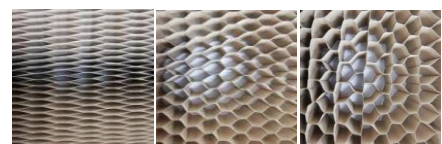


図 3 ハニカムの形状の変化

3 結果

ハニカムペーパーの単位体積当たりの衝撃エネルギー吸収量を図 4 に示す。単位体積当たりの衝撃エネルギー吸収量は、およそ 80 ~ 110 kJ/m³であった。ハニカムペーパーを広げ、 θ が増加しても単位体積当たりの衝撃エネルギー吸収量に大きな変化は見られなかった。

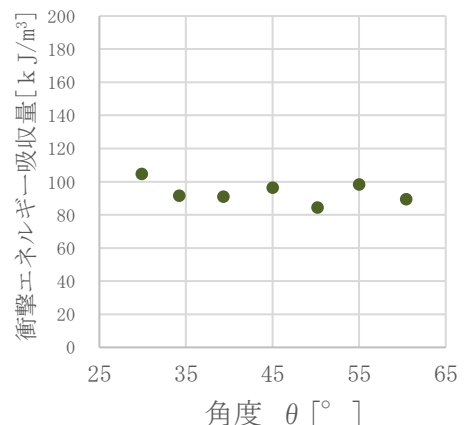


図 4 衝撃エネルギー吸収量の変化

4 考察

今回の結果から、 θ が大きくして紙の密度が低下しても、構造としての強度が上がり、ハニカムペーパーの衝撃エネルギー吸収量は変化しないと考えられる。異なる形状のおもりを用いた従前の結果との比較を図 5 に示す。赤線はヘルメットの強度基準である。従前の研究では、ハニカムペーパーに対して平面で接触する形状のおもりを使用していたが、測定時の誤差が大きくなってしまった。その要因は、接触面に傾きが生じたことで、変形した体積を求める際に精度が低くなったことだと考え、おもりを鉄球に変更した。 θ を大きくしても衝撃エネルギー吸収量が大きく変化していないという点で従来通りの結果が得られており、測定時の誤差は激減した。しかし、おもりを鉄球にした際の衝撃エネルギー吸収量は、平面でハニカムペーパーと接触するおもりを用いた時と比べ約 80%減少し、ヘルメットの安全基準を満たせなくなった。従来のおもりと鉄球を用いた時の落下跡を図 6 にそれぞれ示す。従来のおもりは、油粘土を乗せたアクリル板がハニ

カムペーパーに対して平行に衝突するもので、潰れる深さが変化しても接触する面積は変化しなかった。一方、鉄球の場合は潰れる深さが増加していくと接触面積が増加する特徴がある。鉄球では従来のおもりでは小さな破れが発生しただけだったが、鉄球では、ハニカム構造の糊付け部分が大きく剥がれていたことが分かった。また、剥がれが生じた部分は水平方向に潰れ、ハニカム構造が崩れていることが分かった。これは、おもりの形状によって圧力のかかり方が異なっていることが原因だと考えられる。特に鉄球では接触面積が小さいときに大きな圧力がかかり、ハニカム構造そのものを破壊してしまうため強度が低下したと考えた。また、球面で接触する場合は潰れる際に横方向への押し広げる力が生じていることも見てとれる。今回の実験から、ハニカムペーパーは衝突する物体の形状によって強度が変化することが示唆された。開発を目標としているヘルメットは転倒時の怪我の防止を目的としており、衝突面はほぼ平面であると想定される。しかし、図 7 に示すようにヘルメット側の接触面は球面になっているため、現在の設計では、平面での接触時のような強度が得られるとは考えにくい。今後は想定される実際の状況により近い形で実験を行い、安全基準を満たすヘルメットの設計を行いたい。

ハニカム構造を応用した避難所用ペーパーベッドの開発

1 動機・目的

近年、大規模な自然災害が多発しており、段ボールの上に毛布1枚で寝ている避難所の人々の姿が報道されていた。現在、段ボールベッドも普及し始めているが、新型コロナウイルスの影響により、仕切りとしての段ボールの需要が高まっているため、ベッドとして使用する分を確保できない可能性がある。そこで、避難所生活における睡眠時の心身の負担を軽減することを目的に、ハニカム構造を利用したペーパーベッドの実用化に向けた研究を始めた。

2 フィールドワーク

静岡県富士市・富士宮市の市役所防災危機管理課を訪問し、災害対策や災害発生時の対応、避難所の設備、感染症対策などについてヒアリングを行った(図8)。調査結果を抜粋して示す。

- ・床に寝ると埃が舞った際に呼吸器官に入ることもあり、病気にかかる可能性が高まるため、避難所では寝る場所を高くする方法を考える必要がある。
- ・避難所の物資支援は協定を結んでいる企業に物資の支援を要請する。協定で賄えない物資に対しては、他の国や自治体に要請をする。物資が避難所に到着するまでに最低3日は要する。
- ・静岡県第4次地震被害想定によると災害の想定規模は以下の通りである。

静岡県全体 死者：約105,000人 全壊家屋：304,000棟

富士市 死者140人 全壊家屋6,180棟 避難者想定数：26,666人

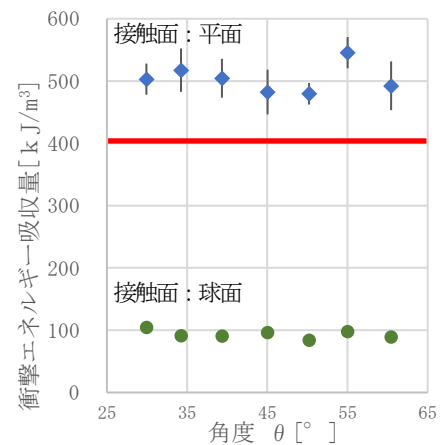


図5 衝撃エネルギー吸収量の接触面の形状による比較

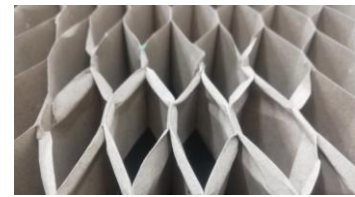


図6 おもりによる落下跡の違い (上: アクリル板, 下: 鉄球)



図7 試作したハニカムペーパーヘルメット



図8 訪問の様子

3 保温効果

(1) 敷物の違いによる水温低下にかかる時間の変化

ア 実験方法

アルミバッドに沸騰した湯を 300 ml 注ぎ、40℃になるまで放置した。40℃になった時点で図 9 のようにアルミバッドを測定対象物の上に置き、水温が 1℃下がるまでに必要な時間を 40℃から 25℃になるまで 1℃ごと測定した。室温は 18℃、試行回数は 4~12 回とした。測定対象物として、ハニカムペーパー (図 10)、敷布団、マットレス、床、タオルケット (図 11) を用いた。また、より高い保温効果が得られることを期待し、ハニカムペーパーの上にタオルケットを敷いて測定を行った。

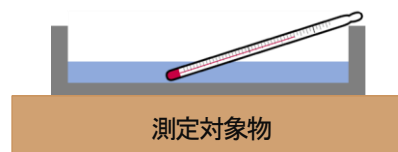


図 9 水温低下の実験装置

イ 結果

40℃から 25℃になるまでの所要時間を計測した水温の変化を図 12 に示す。床を基準 (0%) すると、各測定対象物の上で水温が 25℃になるまでにかかる時間は、ハニカムペーパーで+52%、タオルケットで+56%、敷布団で+67%、ハニカム+タオルケットで+80%、マットレスで+108%増加した。ハニカムペーパーの保温効果はタオルケットと同程度だが、タオルケットと組み合わせることで温度低下にかかる時間が約 30%増加し、保温効果が向上した。

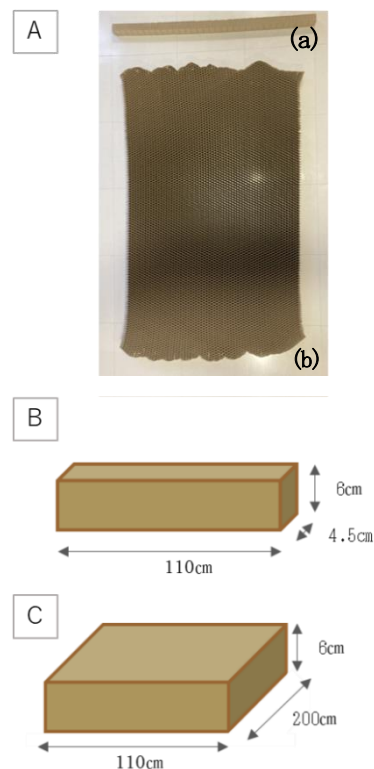


図 10 使用したハニカムペーパー

A (a) 収納時 (b) 展開時の写真

B 収納時の大きさ, C 展開時の大きさ

(2) 布団内温度の時間変化

ア 実験方法

被験者が測定対象物の上で横になり、上からタオルケットを被せた状態で温度を 20 分間計測した。(図 13) 室温は 20℃であった。被験者は平熱 36.3℃の 20 代の男性 1 名とした。試行回数は各測定対象物につき 1 回とした。測定対象物は床、敷布団、マットレス、ハニカムペーパーを用いた。また、ハニカムペーパーの上にはタオルケットを敷き、紙と身体が直接接触れないようにした。

イ 結果

測定開始時の温度を基準とした、20 分間のタオルケット内の温度変化を図 12 に示す。床で寝た際には、開始時よりも温度が低下しており、熱を奪われ続けていることが分かる。敷布団とマットレスは類似した性能を示しており、20 分間で温度が約 2℃上昇した。一方、ハニカムペーパーは 4℃以上の上昇があり、最も高い保温効果を示した。



図 11 実験に使用した道具

A 敷布団 B マットレス

C 床 D タオルケット

(3) 考察

水で実験した際の結果ではマットレスが最も保温性を発揮したが、布団内の温度を計測すると、ハニカム+タオルケットの組み合わせがマットレスの保温性能を上回る結果となった。(1) と (2) の実験でハニカムペーパーの優位性が異なるのは、熱源と測定対象物の接触面積による違いが

原因だと考えた。ハニカム構造は熱伝導性の低い空気の層を作ること
で高い断熱性を持つ。単にアルミバットを置いた時より、その上から
布団を被せた方がセル内部の空気の動きが少なくなり、ハニカムの保
温性能がより発揮されたと考えた。

4 アンケート調査

(1) 実験方法

10代～50代の男女計20名を対象に、評価対象物に寝た際の寝心地
に関するアンケート調査を行った。評価対象物は、床、敷布団、マッ
トレス、ハニカムペーパーとし、寝心地に関する評価項目に関して5
段階評価を行った。評価項目は、マットレスの寝返りしやすさと寝心
地が睡眠に及ぼす影響の研究で木暮貴政らが用いたアンケートを参
考に、温冷感、柔らかさ、心地、湿潤感、寝返り、腰の具合、肩の具
合、マットレスの好み、寝心地、総合評価の10項目とした。

(2) 結果

アンケート結果を図15に示す。全ての項目でハニカムペーパーは
他の対処物と比べてマットレスに最も近い結果を示した。ハニカムペ
ーパーとマットレスのアンケート結果は、腰・肩の具合などの6項目
では、点差が1点以内に収まった。一方、柔らかさの項目では最も結
果に違いがあり、1.5点程の差が生じた。

(3) 考察

寝姿勢のバランスが悪く、特定の部位に圧力が集中すると、肩の具
合・腰の具合などにおける評価が低くなる。ハニカムペーパーは肩の
具合、腰の具合の2項目に関してマットレスと同等の評価を得ている
ため、適切な寝姿勢が保持できると考えられる。しかし、柔らかさの
項目ではマットレスよりも敷布団に近いと評価されている。つまり、
ハニカムペーパーは寝姿勢の保持できるが、現状の設計では強度が高
すぎたために潰れる量が少なく、圧力分散効果が低いと考えられる。

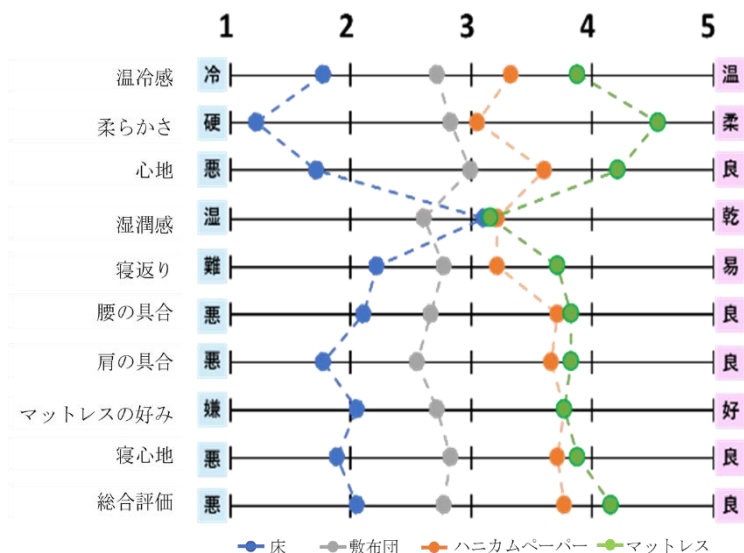


図15 アンケート結果の一覧

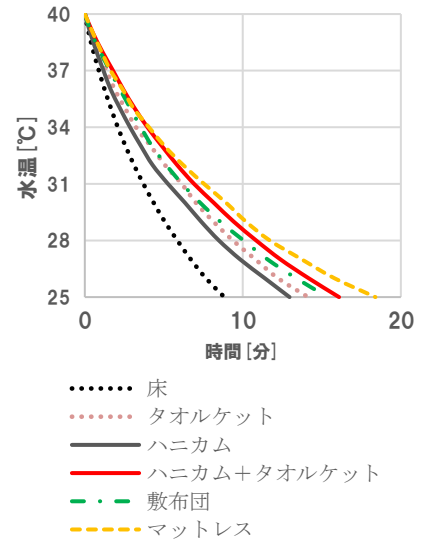


図12 40°Cから25°Cになるまでの所要時間

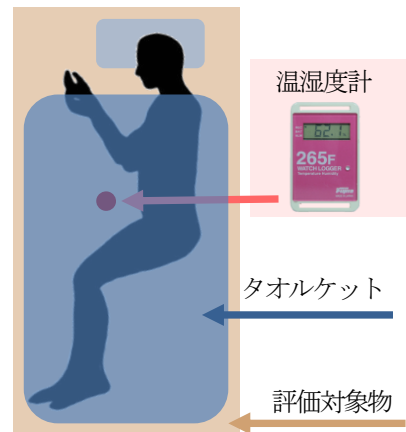


図13 測定の様子

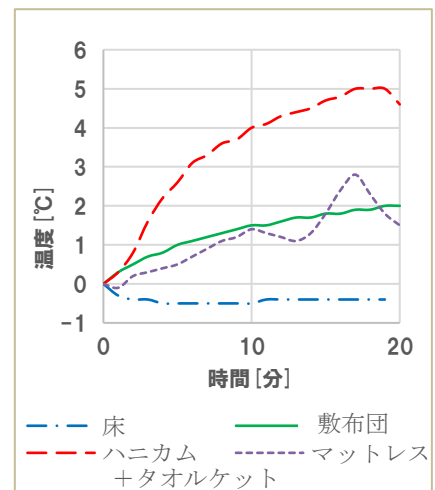


図14 布団内の温度変化

5 圧力分散効果

(1) 実験方法

測定対象物の上に圧力分布センサーを敷き、被検者が仰向けに寝た時の圧力の分布を測定した。測定には住友理工 体圧分布センサーSR ソフトビジョン全身版（測定面積1800×700mm² 測定範囲15-110mmHg）を使用し、測定対象物は床、敷布団、マットレス、ハニカムペーパーを用いて比較した。被験者は身長161±11cm、体重56.5±12.5kgの男女17名を対象とした。

ここで、ハニカムペーパーに圧縮試験を行った結果を図16に示す。深さ方向に約1mm潰れた際に高い応力を示し、その後は約200Nで潰れることが分かる。この結果を元に、ハニカムペーパーは広げてから表面を2mm以上潰してから使用した。

(2) 結果

例として、被験者Aの測定結果を図17に示す。圧力が大きくなるほど暖色を示し、圧力が小さい領域は寒色で表される。測定上限である146hPa以上は赤色で表示される。床を100%（図18赤線）としたときの体の各部位にかかる圧力比を図18に示す。これは被験者計17名の平均値を示している。部位ごとに比較すると、すべての対象物で頭部への圧力効果が最も大きく、背部と臀部には同程度の効果が見られた。測定対象物ごとに比較すると、マットレスの圧力分散効果が最も高く、床に比べて頭部は62%、背部は48%、臀部は51%、全身で見ると46%圧力を軽減した。敷布団の場合、頭部で56%、背部で21%、臀部で16%、全身で19%圧力を軽減した。ハニカムペーパーでは頭部で29%、背部で15%、臀部で14%、全身で13%圧力を軽減した。比較した測定対象物の中で最も圧力分散効果が最も低くなった。

(3) 考察

ハニカムペーパーは敷布団よりも圧力分散効果が低い。しかし、寝心地に関するアンケートでは、敷布団よりも総合評価が高く、寝心地が良いという回答が多く得られた。マットレスとハニカムペーパーは頭部、背部、臀部で圧力分散効果に大きな差は無いが、敷布団は頭部への圧力分散効果が背部、臀部に比べて大きいため、適切な寝姿勢を保持できていないと考えられる。ハニカムペーパーを製作する際に糊付けの間隔を変更することでハニカムの形状を変え、強度を下げることで、適切な寝姿勢を保持したまま高い圧力分散効果が発揮できると期待できる。強度が高い現在の状態では、子供などの体重が軽い使用者の場合は、ほとんど変形せず効果が得られないだろう。しかし、強度を下げすぎた場合、大柄な人の使用には耐えきれず、睡眠時に潰れ切り、体が床についてしまうことが考えられる。避難所用ベッドとして活用するためには、様々な体格での使用に対応し、効果を発揮できる強度を模索する必要がある。各部位

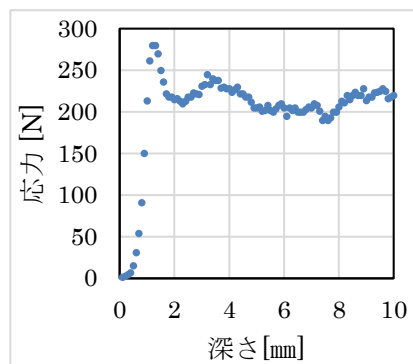


図16 圧縮試験の結果

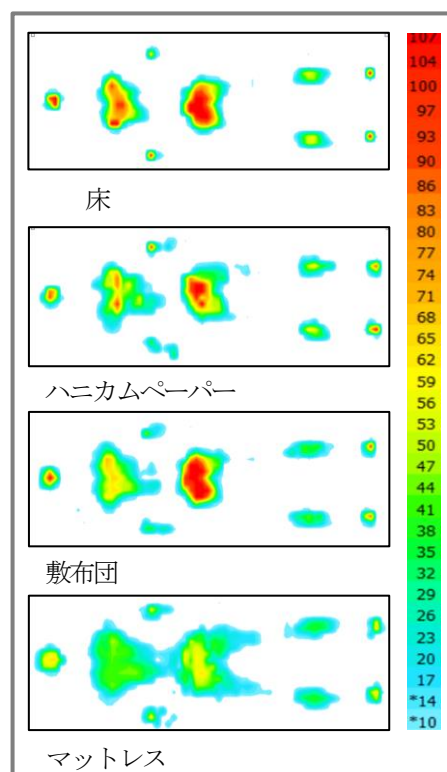


図17 測定結果の一例

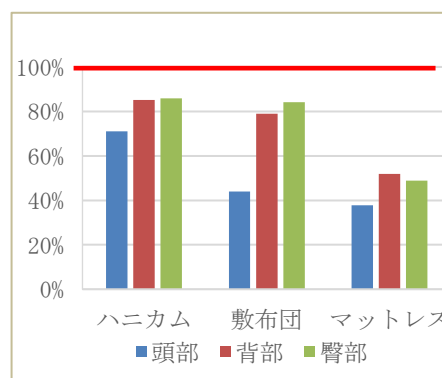


図18 体にかかる圧力比

における効果の比を保ちつつ全体の強度を落とし、より軽い力で変形して体にフィットするようベッドを開発できれば、圧力分散効果と寝心地を更に向上させることができるだろう。今後はハニカム構造のセルの形状を検討し、最適な強度となる設計条件を見出すことで、避難所における2次的な健康被害の軽減につなげていきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻、ご協力を賜りました。厚く御礼申し上げます。

- ・本研究に用いたハニカムペーパーはナゴヤ芯材工業株式会社様より提供していただきました。
- ・静岡大学の島村佳伸教授と、星陵高等学校の渡辺富夫先生には熱心な指導をいただきました。
- ・2019年から2020年にかけて、G S C 静岡大学未来の科学者養成スクールにて研究をさせていただきました。
- ・フィールドワークでは富士宮市役所危機管理局、富士市役所防災危機管理課の皆様にご協力いただきました。
- ・圧力分布の測定装置は住友理工株式会社からお借りしました。

参考文献

- 1) 総務省統計局 人口推計 (2021年8月報) <https://www.stat.go.jp/data/jinsui/pdf/202108.pdf>
- 2) 国立社会保障・人口問題研究所推計 <https://seniorguide.jp/article/1207592.html>
- 3) 消防庁 高齢者の事故の状況について(2018年9月)
https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_safety/caution/caution_009/pdf/caution_009_180912_0002.pdf
- 4) L. J. Gibson, M.F.Ashby, Cellular Solids, Pergamon Press, 1988
(日本語版: 大塚正久訳 セル構造体 内田老鶴圃 1993)
- 5) 上杉朋花 星陵高等学校 ハニカム構造の探究 Level15 構造と湿度が紙製ヘルメットの強度に及ぼす影響
(第64回日本学生科学賞 最終審査進出研究作品概要)
<https://event.yomiuri.co.jp/jssa/storage/archives/64/HP005CE.pdf>
- 6) N. J. Mills Protective capability of bicycle Helmets, PhD School of Metallurgy and Materials, University of Birmingham
- 7) 野崎兼介, 小林秀敏, 堀川敬太郎, 渡辺恵子 自転車用発泡スチロールの圧縮変形に及ぼすひずみ速度の影響
(一般社団法人 日本機械学会年次大会講演論文集 2008. 6(0), 267-268)
- 8) Luca Di Landro, Giuseppe Sala, Daniela Olivieri,
Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets,
Polymer Testing 21 (2002) 217-228
- 9) 吹野雅彦
サンドイッチ構造用心材としてのハニカム (日本機械学会誌 第71巻 第593号 昭和43年6月)

10) 内閣府 災害関連死について (2019年)

<http://www.bousai.go.jp/taisaku/kyuujo/pdf/r01kaigi/siryos.pdf>

11) 水谷嘉浩, 根本昌宏

冬季の避難所における4種類の簡易ベッドの防寒・保温効果に関する研究
(寒地技術シンポジウム, 2018)

12) 木暮貴政, 久保田富夫, 村山陵子, 新村洋未

マットレスの寝返りのしやすさと寝心地が睡眠に及ぼす影響
(日本生理人類学会誌 Vol16, No, 4 2011, 11 P171-176)

13) 日本睡眠科学研究所 「体圧分散」とは

<https://www.nishikawa1566.com/company/laboratory/research/singu/>