

学術研究助成金〔独創的・先駆的研究〕実績報告書

令和 7 年 4 月 21 日 提出

関連する持続可能な開発目標（SDGs）

1 貧困	2 飢餓	3 保健	4 教育
5 ジェンダー	6 水・衛生	7 エネルギー	8 経済成長と雇用
9 インフラ，産業化，イノベーション	10 不平等	●	11 持続可能な都市
12 持続可能な消費と生産	13 気候変動		14 海洋資源
15 陸上資源	16 平和	17 実施手段	

1 課題番号： 23 独先 08

2 研究者（研究代表者）

① 所属部科校： 理工学部・（理工学研究所）

②資格・氏名： 教授・富田隆太

3 研究課題

①和文表記： 子どもと高齢者を対象とした床の快適性と安全性の実装とデザイン

②英文表記： Implementation and design of floor with comfort and safety for children and the elderly

4 研究期間：令和 5 年度～令和 6 年度

5 現在までの達成度

※当初の研究目的に対する達成度について，自己評価を行ってください

①区 分 A：当初の計画以上に進展している，B：概ね順調に進展している，C：やや遅れている

②達成度 研究期間全体（2年間）を100%とした場合に，現在の進捗状況を〇〇%で評価してください

①区 分： B

②達成度： 90 %

6 研究組織

①研究代表者

資 格・氏 名 (研究者番号)	所属部科校 実施研究所	役 割 分 担
教授・富田隆太 (40339255)	理工学部 理工学研究所	研究総括及び快適性・安全性に関する 研究実施

②研究分担者

[illegible]

7 研究目的

本研究は、子ども・高齢者にとって安全で、かつ子どもの動作による騒音（床衝撃音）の問題がクリアできる、「子どもと高齢者を対象とした床の快適性と安全性の実装とデザイン」である。床仕上げ材に、複数層を導入し、騒音トラブルの指摘が多い重量床衝撃音、転倒時の安全性を向上させる層をそれぞれ独立に作用させようと考えている。複数層により、歩行時のような「小さく長い衝撃力」には硬く作用し、床衝撃音の原因となりうる飛び跳ねのような「やや大きく短い衝撃力」には抵抗し、転倒衝突時のような「非常に大きく、非常に短い衝撃力」にはかなり抵抗するような床仕上げ材の実装を目的としている。

本研究では、以上のような床仕上げ材の実装とデザインを確立することを目的とし、例えば、保育施設、高齢者施設、子どもと高齢者が交流する宅幼老所、共同住宅の共有スペース等の施設に導入することで、社会的貢献を目指している。また、子どもの音環境に関する騒音トラブルは社会的にも問題として取り上げられており、床衝撃音の解決は、共同住宅等の床仕上げ構造の研究にも応用可能と考えられ、子どもの成育を妨げない環境創造に貢献できる。

8 研究概要

本研究では、床仕上げ材に着目し、重量床衝撃音遮断性能、及び転倒衝突時の硬さからみた安全性について、実験的検討を行い、歩行感覚等の居住性能を確認した上で、実用的な仕様の提案を目的にしている。

研究範囲として、断面構成の異なる、フローリング、カーペット、畳、フローリング+乾式二重床、カーペット+乾式二重床、畳+乾式二重床の床仕上げ材及び床仕上げ構造の実装を行う。また、それらの実装までに得られた知見、及び、実建物での実験を通して、重量床衝撃音遮断性能、及び転倒衝突時の硬さからみた安全性に着目した床構造の設計指針の策定を行う。

重量床衝撃音遮断性能について、種類や厚さを組み合わせて、床仕上げ材、床仕上げ構造の実験を行う。床仕上げ材、床仕上げ構造について、重量床衝撃音の検討を行う。試作したフローリング、カーペット、畳を10㎡施工して、試験機関である建材試験センターの壁式構造の試験装置で、フローリング、カーペット、畳の床衝撃音レベル低減量を測定する。

転倒時の硬さからみた安全性については、転倒事例に関するアンケート調査（インターネット：業務委託）を実施・分析することで、床への転倒時の衝突部位や衝突の仕方等を明らかにする。それらを基に、頭部以外の転倒衝突部位の試作を行う。身体各部の転倒評価モデルを構築し、試作した畳床等の転倒衝突実験を行う。子ども、成人、高齢者、障害者、そして男女差など多様な人々の身体寸法、各肢重量ならびに関節可動域制限等の身体特性をソフトウェア上の仮想モデルとして構築する。そして、床転倒において、肢の一部が床に接触したときの荷重負荷（衝撃）、ならびに床材による反発から、実際に人体が受ける衝撃負荷を予測する。転倒のきっかけは、立位姿勢等任意に指定した姿勢から一定の外力をかけた転倒と、立位姿勢から一定の不安定姿勢による自然発生的な転倒などをシミュレートできる。これらは一定の姿勢における、身体の仮想的な重心位置、ならびに転倒が始まるときに動き出す関節位置より上部の仮想重心位置を示すことができる。

また、畳床等の実装及び床構造の設計指針の策定を行う。

9 研究結果

本研究では、前述したように、床仕上げ材に着目し、重量床衝撃音遮断性能について実験的検討を行い、転倒衝突時の硬さからみた安全性について検討を行い、歩行感覚等の居住性能を確認した上で、実用的な仕様の提案を目的にしている。以下、研究結果を述べる。

9-1. 防振を考慮したフローリング及びカーペットについて

防振を考慮したフローリング及びカーペットを製作し、重量床衝撃音と歩行時の硬さに関する実験的検討を行った。

表 1 にフローリングとカーペット試験体の概要を示す。F1, F2, C1, C2 は、既報¹⁾の T4 の結果を参考に、防振パッドを全面に挿入して、その上部の質量との防振効果を狙ったものである。F1, F2, C1, C2 の試験体は、フローリング又はカーペットの下に、遮音シート、タタミボード、防振パッド 25 mm、タタミボードで構成されており、タタミボードの厚さで全体の厚さ（約 55 mm）を調整した。なお、防振パッドは、既報¹⁾と同様のエーテル系の発泡ポリウレタン・エラストマー（0.16 g/cm³）を用いた。

表 1 フローリングとカーペット試験体の概要

Specimen	Type	Size (mm × mm)	Thickness (mm)	Mass (kg)	Areal density (kg/m ²)	Cross section specifications
F1	Flooring with anti-vibration	900 × 1800	54.4	32.6	20.1	Flooring (15mm) + Sound insulation sheet (0.8mm × 3) + Tatami board (5mm) + Anti-vibration pad (25mm) + Tatami board (7mm)
F2	Flooring with anti-vibration	900 × 1800	55.9	35.3	21.8	Flooring (11.5mm) + Sound insulation sheet (0.8mm × 3) + Tatami board (10mm) + Anti-vibration pad (25mm) + Tatami board (7mm)
C1	Carpet with anti-vibration	900 × 1800	55.4	35.2	21.7	Carpet (6mm) + Sound insulation sheet (0.8mm × 3) + Tatami board (15mm) + Anti-vibration pad (25mm) + Tatami board (7mm)
C2	Carpet with anti-vibration	900 × 1800	54.4	34.4	21.2	Carpet (10mm) + Sound insulation sheet (0.8mm × 3) + Tatami board (10mm) + Anti-vibration pad (25mm) + Tatami board (7mm)

床衝撃音レベル低減量の測定は、壁式鉄筋コンクリート造の実験室にて実施した。測定は、200mm スラブで行った。床衝撃音レベル低減量の測定は、JIS A 1440-2 に準拠して行った。コンクリートスラブ素面及び乾式二重床上（2 種類、全面施工、図 1, 2）に試験体を施工して、床衝撃音レベル低減量の測定を行った。但し、試験体については、試験体 1 枚を加振点によって移動した。加振は、JIS A 1418-2 の標準重量衝撃源（衝撃力特性（1））とした。なお、試験体は直置きしたのみで、接着はしていない。

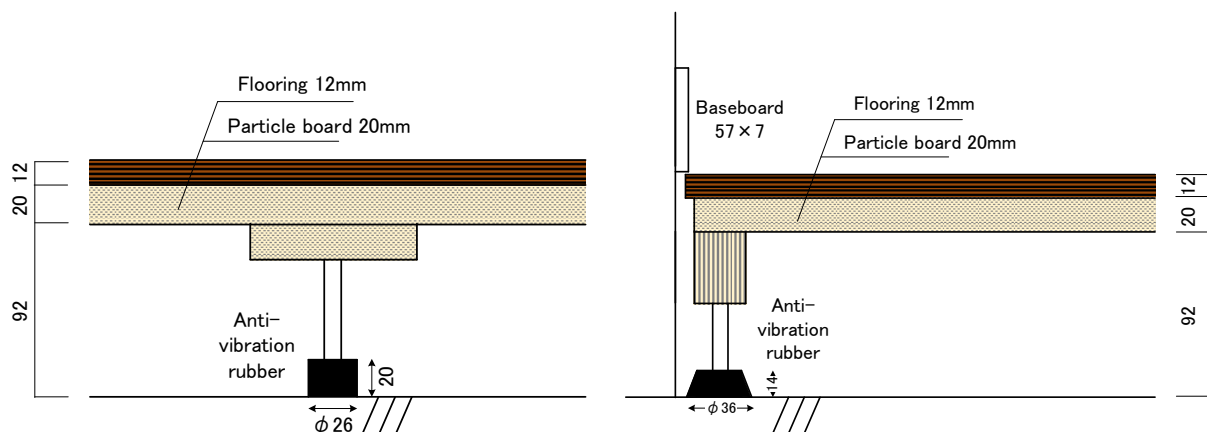


図 1 乾式二重床 A の断面図（左：一般部，右：端部）

〔 9 研究結果（つづき）〕

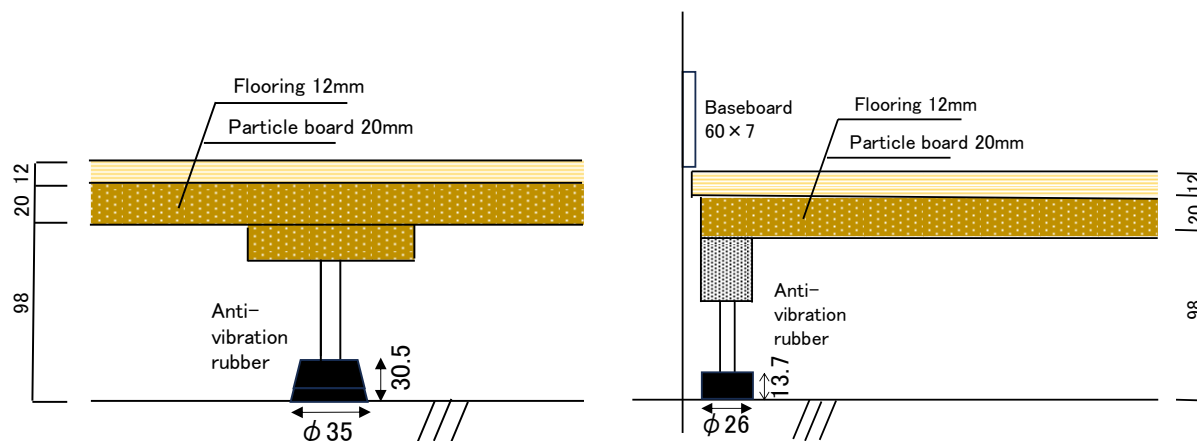


図 2 乾式二重床 B の断面図（左：一般部，右：端部）

図 3 にコンクリートスラブ素面，図 4，5 に乾式二重床上に試験体を施工したときの床衝撃音レベル低減量を示す。コンクリートスラブ素面の場合では，63 Hz 帯域で 1～3 dB，125 Hz 帯域で 3～4 dB の低減量であった。また，乾式二重床 A，B に比べて，試験体を施工することにより，63～500 Hz 帯域で床衝撃音レベル低減量が大きかった。なお，乾式二重床単体と比較すると，A では，63 Hz 帯域は 4 dB，125 Hz 帯域は 3～4 dB の差であった。B では，63 Hz 帯域は 5～6 dB，125 Hz 帯域は 2～3 dB の差であった。

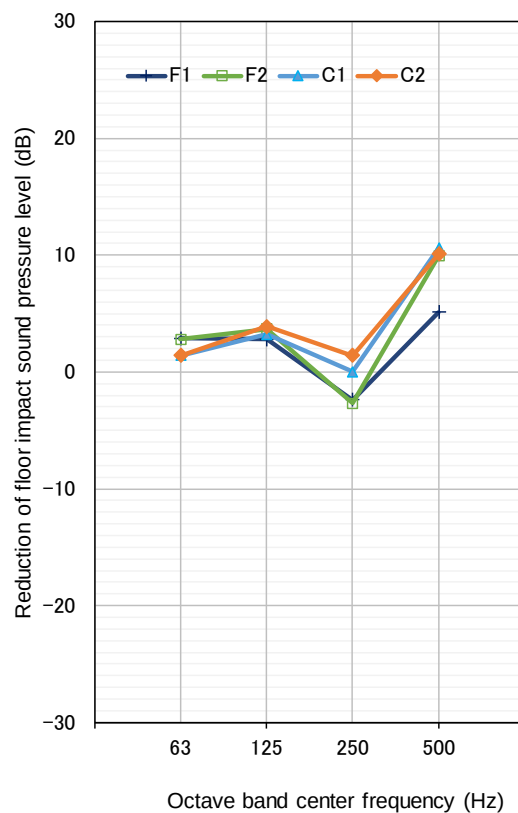


図 3 コンクリートスラブに試験体を施工したときの床衝撃音レベル低減量

〔 9 研究結果（つづき）〕

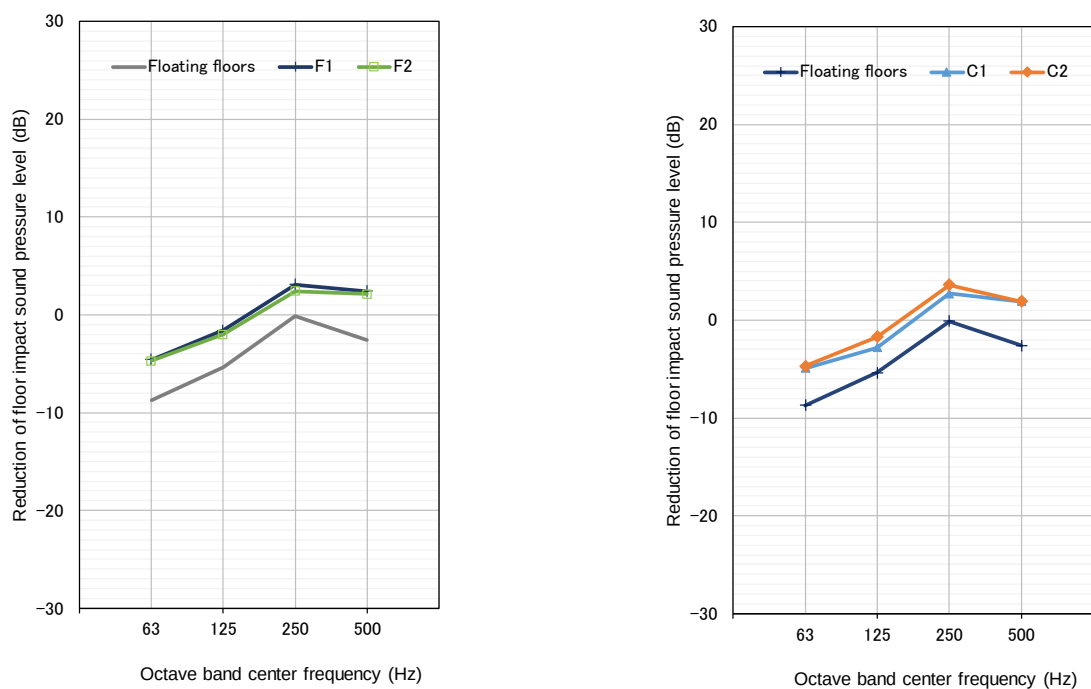


図 4 乾式二重床 A に試験体を施工したときの床衝撃音レベル低減量

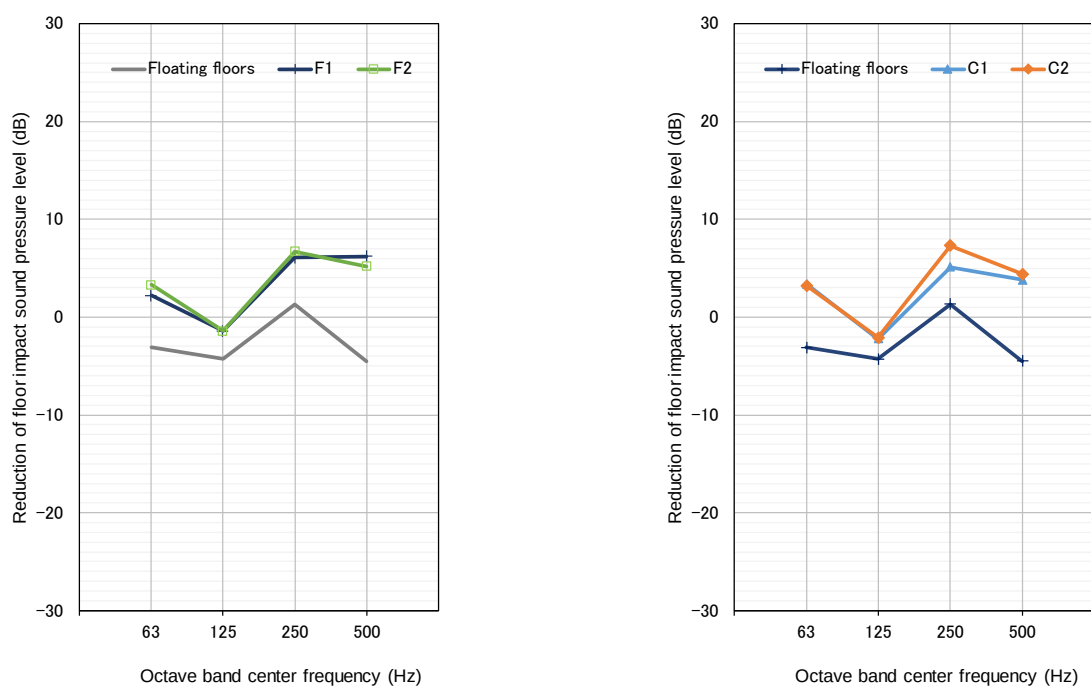


図 5 乾式二重床 B に試験体を施工したときの床衝撃音レベル低減量

既報^{1)~2)}と同様な方法で分析した歩行時の硬さに関する結果を図 6~9 に示す。図 7 の歩きやすさを見ると、F2, C1, C2 は歩きやすいと評価された。図 9 の総合的な床の硬さに対する満足度を見ると、どの床も満足側の評価であった。

〔9 研究結果（つづき）〕

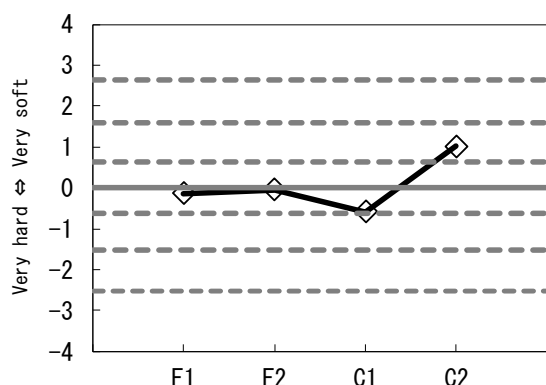


図6 歩行時の硬さ

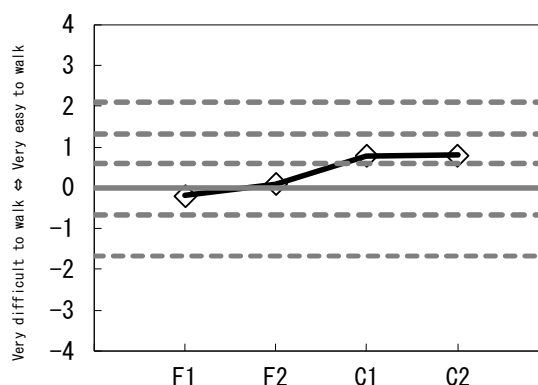


図7 歩きやすさ

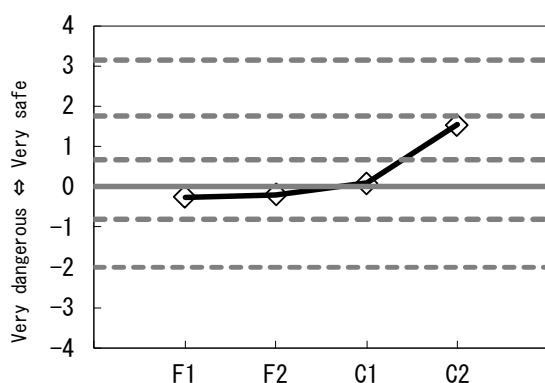


図8 転倒時の安全性

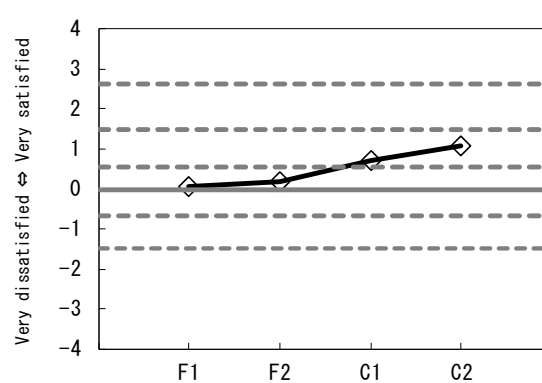


図9 総合的な床の硬さに対する満足度

参考文献

- 1) 富田 隆太, 阿部 今日子 (2021): 畳を対象とした床衝撃音と転倒衝突及び歩行時の硬さに関する実験的検討, 日本建築学会環境系論文集, 第86巻, 第790号, pp. 873-882.
- 2) 富田 隆太, 阿部 今日子 (2022): 防振を考慮した畳の床衝撃音と転倒衝突及び歩行時の硬さに関する実験的検討, 日本建築学会技術報告集, 第28巻, 第70号, pp. 1260-1265.

9-2. 4.5畳の防振を考慮したフローリング及びカーペットによる床衝撃音対策

本研究では、9-1に続く検討として、4.5畳の防振カーペットを製作した。合計2700×2700mm（4.5畳）の防振カーペットをコンクリートスラブ及び乾式二重床上に施工して実験的検討を行った。

表2にカーペット試験体の概要を示す。9-1と同様なものを用いた。表2に示すC2の試験体（2700×2700mm）で実験を行った。カーペットの下に、遮音シート、タタミボード、防振パッド25mm、タタミボードで構成されており、タタミボードの厚さで全体の厚さ（約55mm）を調整した。また、遮音シートについては、0.8mm厚で、面密度2.4kg/m²であった。なお、防振パッドは、既報³⁾と同様のエーテル系の発泡ポリウレタン・エラストマー（0.16g/cm³）を用いた。

〔 9 研究結果（つづき）〕

表 2 防振カーペットの概要

Specimen	Type	Size (mm × mm)	Thickness (mm)	Mass (kg)	Areal density (kg/m ²)	Cross section specifications
C2	Carpet with anti-vibration	2700 × 2700	54.4	155.4	21.3	Carpet (10mm) + Sound insulation sheet (0.8mm × 3) + Tatami board (10mm) + Anti-vibration pad (25mm) + Tatami board (7mm)

床衝撃音レベル低減量の測定は、壁式鉄筋コンクリート造の実験室（建材試験センター）にて実施した。測定は、200 mm スラブで行った。図 10 に、実験対象とした乾式二重床を示す。乾式二重床の面材は、パーティクルボード 20 mm（面密度 14.1 kg/m²）+フローリング 12 mm（面密度 7.3 kg/m²）であった。乾式二重床の支持脚間隔は、短辺方向は 455 mm，長辺方向は 620 mm であった。また、一般部，端部の支持脚について，ゴム硬度はいずれも 67° であった。次に，支持脚とコンクリートスラブの接着について，一般部は非接着，端部は養生テープ貼付の上，接着した。

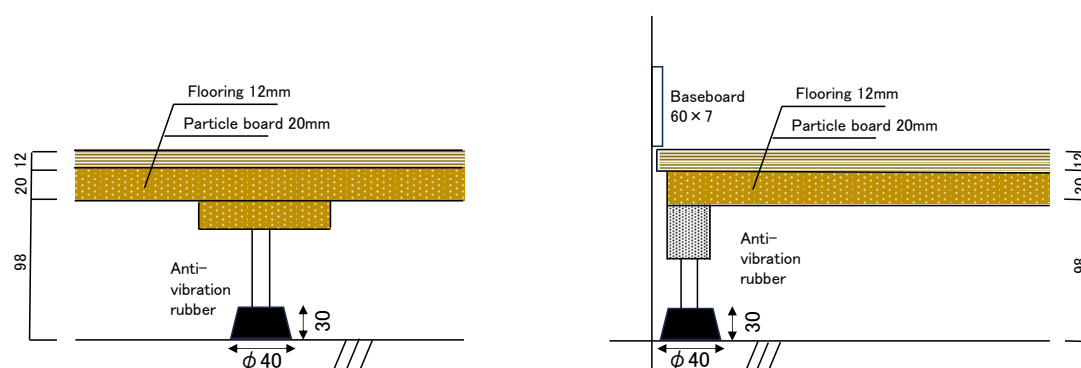


図 10 乾式二重床（上図：一般部，下図：端部）

床衝撃音レベル低減量の測定を，JIS A 1440-1，JIS A 1440-2 に準拠して行った。加振は，JIS A 1418-1，JIS A 1418-2 の標準軽量衝撃源，標準重量衝撃源とした。タッピングマシン，バングマシン，ゴムボールを用いて，S1～S5 の 5 点を加振した。受音点も L1～L5 の 5 点とした。床衝撃音レベル低減量は，コンクリートスラブ素面から，床仕上げ構造を施工した状態の床衝撃音レベルを差し引いて求めた。なお，乾式二重床は全面（3600×2800mm）に施工した。防振カーペットは 2700×2700mm に施工した。防振カーペットの中央と乾式二重床の中央が重なるように施工した。

また，防振カーペットは，1 体の中では防振パッドを全面に施工している。なお，カーペットは乾式二重床上に，直置きしたのみで，接着はしていない。また，カーペットの自重に加えて，バングマシンの質量もあり，目視ではあるがバングマシン加振による浮き上がりはなかった。

図 11 にバングマシンによる，防振カーペットをコンクリートスラブ素面に施工した時の床衝撃音レベル低減量の結果を示す。図を見ると，63 Hz 帯域で 3 dB，125 Hz 帯域で 7 dB，250Hz 帯域では 9 dB，500 Hz 帯域では 10 dB と，素面に比べて性能が向上していることがわかる。

〔 9 研究結果（つづき）〕

図 12 に、防振カーペットの効果として、カーペットを施工しない乾式二重床に対するレベル差を示す。図を見ると、63 Hz 帯域で 9 dB、125 Hz 帯域で 8 dB、250 Hz 帯域では 9 dB、500 Hz 帯域では 3 dB と、乾式二重床に比べて性能が向上していることがわかる。

図 13 にゴムボールによる、防振カーペットをコンクリートスラブ素面に施工した時の床衝撃音レベル低減量の結果を示す。図を見ると、63 Hz 帯域で 0 dB、125 Hz 帯域で 3 dB、250 Hz 帯域では 11 dB、500 Hz 帯域では 12 dB と、素面に比べて性能が向上していることがわかる。

図 14 に、防振カーペットの効果として、カーペットを施工しない乾式二重床に対するレベル差を示す。図を見ると、63 Hz 帯域で 10 dB、125 Hz 帯域で 8 dB、250 Hz 帯域では 11 dB、500 Hz 帯域では 5 dB と、乾式二重床に比べて性能が向上していることがわかる。

よって、バングマシン及びゴムボールによる防振カーペットの効果としては、重量床衝撃音で重要な周波数帯域である 63～125 Hz 帯域では、コンクリートスラブに比べて乾式二重床に防振カーペットを施工することで、防振カーペットの効果が大きくなることがわかった。これは、防振カーペットの防振による効果と、乾式二重床上に施工することで乾式二重床の面材より上の質量が増加することによる効果の両方の影響によるものと考えられる。

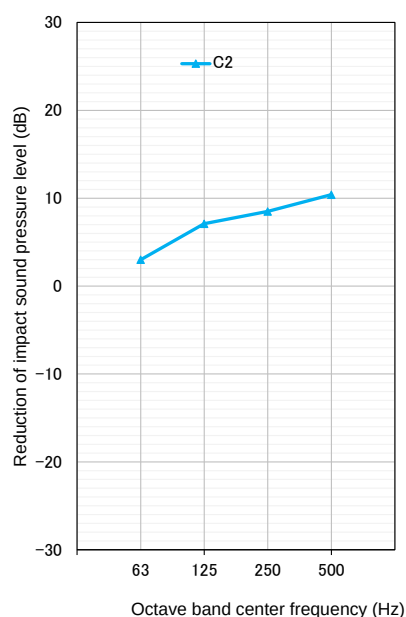


図 11 バングマシンによる防振カーペットの重量床衝撃音レベル低減量

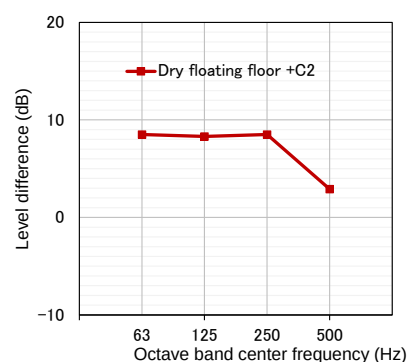


図 12 バングマシンによる乾式二重床に対する防振カーペットの重量床衝撃音レベル差

〔9 研究結果（つづき）〕

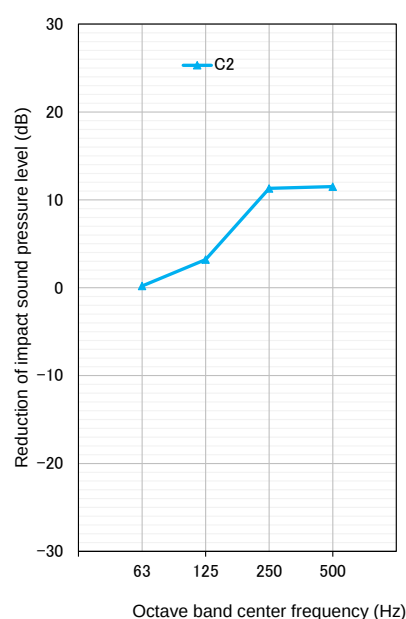


図 13 ゴムボールによる防振カーペットの重量床衝撃音レベル低減量

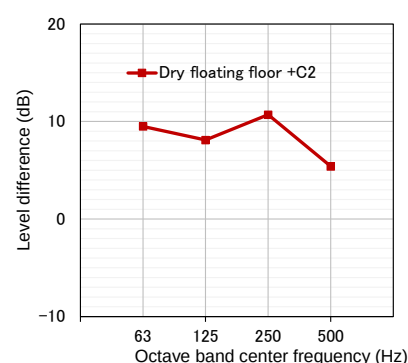


図 14 ゴムボールによる乾式二重床に対する防振カーペットの重量床衝撃音レベル差

参考文献

- 3) 富田 隆太, 阿部 今日子 (2021): 畳を対象とした床衝撃音と転倒衝突及び歩行時の硬さに関する実験的検討, 日本建築学会環境系論文集, 第 86 巻, 第 790 号, pp. 873-882.

9-3. 3D プリンターを使用した転倒モデルの実装

転倒衝突に伴う人体への影響を定量的に評価するため、転倒評価モデルを構築し、畳床における転倒衝突実験を実施する。現在、評価モデルの開発に際して、人間の身体特性に近い仕様を持つ試験体を、3D プリンターを用いて作成している。さらに、異なる仕様の試験体の結果を比較し、人間の物性値に最も近い仕様の特定作業を実施している。なお、作成に際しての検討事項は以下のとおりである。

- ・ JIS 規格に基づいた、モデルの設計を準拠する。
- ・ そのために、試験体の厚みや内部構造を変更しつつ、弾性係数などの人間の物性に近づけた最適仕様を模索する。

今後は以上の試作より人間の特性にもっとも近い評価モデルを使用し、畳床上での転倒衝突条件をシミュレートし、衝撃分布やエネルギー吸収率を測定する予定である。

9-4. 多様な人間モデルにおける床転倒シミュレーションソフト

子ども、成人、高齢者、障害者、そして男女差など多様な人々の身体寸法、各肢重量ならびに関節可動域制限等の身体特性をソフトウェア上の仮想モデルとして構築する（図 15）。そして床転倒において、肢の一部が床に接触したときの荷重負荷（衝撃）、ならびに床材による反発から、実際に人体が受ける衝撃負荷を予測する。

〔9 研究結果（つづき）〕

転倒のきっかけは、立位姿勢等任意に指定した姿勢から一定の外力をかけた転倒と、立位姿勢から一定の不安定姿勢による自然発生的な転倒などをシミュレートできる。これらは一定の姿勢における、身体の仮想的な重心位置、ならびに転倒が始まるときに動き出す関節位置より上部の仮想重心位置を示すことができる（図16）。

これらの転倒プロセスは、簡易的なアニメーションにより刻々と示され、肢位ならびにそれによって変化する重心位置を同時に示すことができるため、転倒防止研究ならびに転倒した場合の床への衝撃の少ない転倒肢位などをシミュレートすることができる。これらは前述のように、多様な身体特性をもつ人々を再現できることから、人間特性による転倒の特徴、対応方法などを示唆できた。

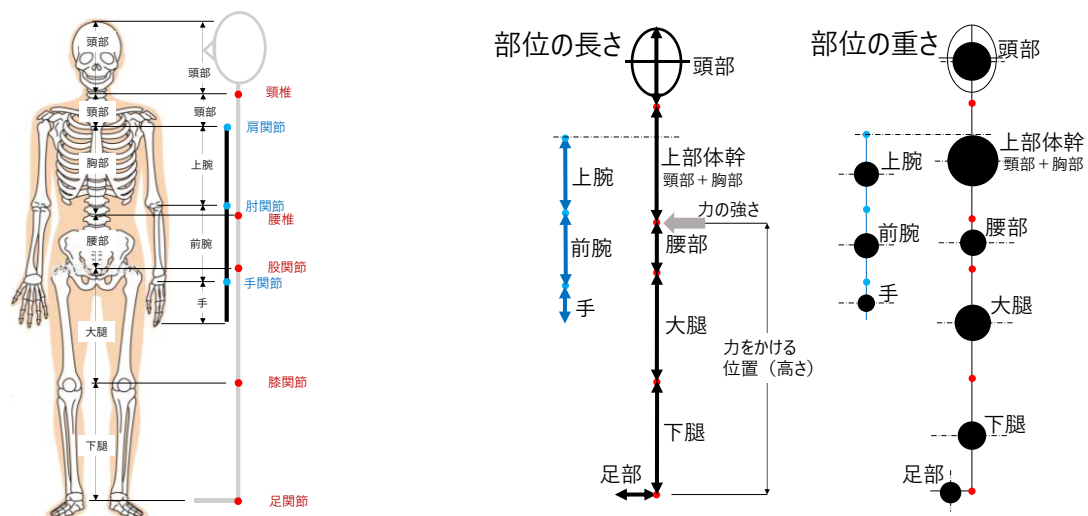


図15 身体寸法、各肢重量ならびに関節可動域制限等の身体特性をソフトウェア上の仮想モデルとして構築

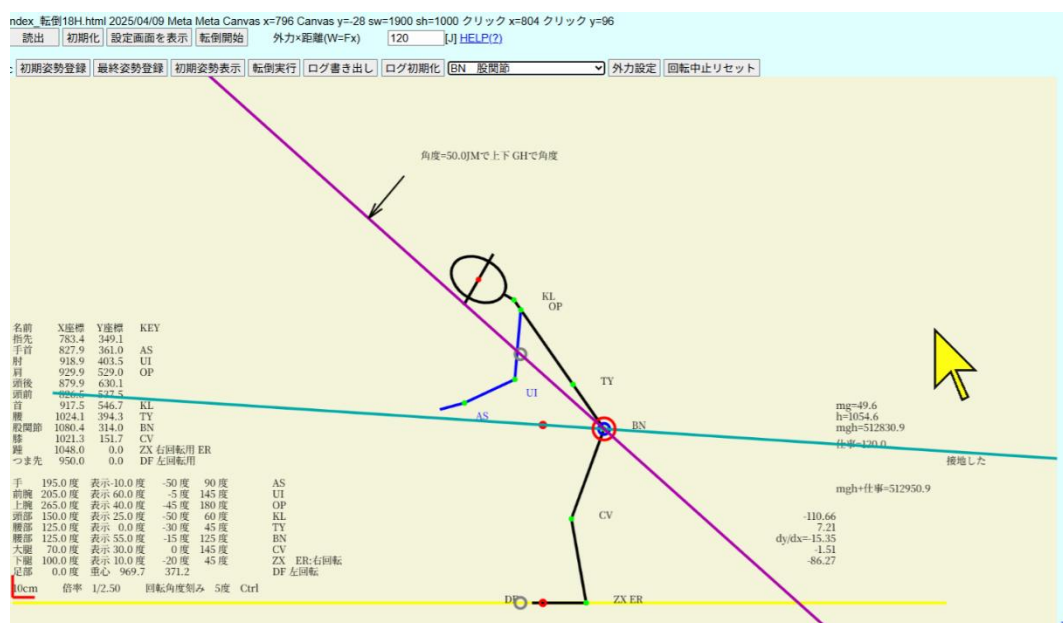


図16 二次元転倒モデルと仮想重心位置と重心移動直線

〔9 研究結果（つづき）〕

身体の基本的モデルの前提は下記の通りである。

- 実際には3次元の物体である人体を、その正中線を通る矢状面（しじょうめん）（図17）に投影される2次元物体とした。
- 両上肢、両下肢は、矢状面から見た2次元物体とした場合、次のような前提条件とした。
 - 人体を上肢は両上肢、下肢は、両上下肢は、それぞれ矢状面から見て同時に同方向に動く。
 - よって2次元平面では、片上肢、片下肢としか表れないため、転倒時の物理的衝撃の計算においては、各肢の重さは実際の片上肢、片下肢それぞれの重さの2倍として計算する。
- 各部位（頭部、体幹、各肢等）は、冠状面から見て、必ず左右対象となる。
 - よって首や体幹のねじれはない。それによる冠状面から見て、上肢、下肢いずれも左右が独立した動きをしない。
- 関節可動域は、公益社団法人日本リハビリテーション医学会「関節可動域表示ならびに測定法改訂に関する告知（2022年4月改訂）」による。
 - 通常時、転倒時においても、その範囲を超えないものとした

転倒と関節可動域制限との関連から、高齢化、疾病などによる関節可動域制限がある者をシミュレートする場合、可動域制限を指定できるようにした。

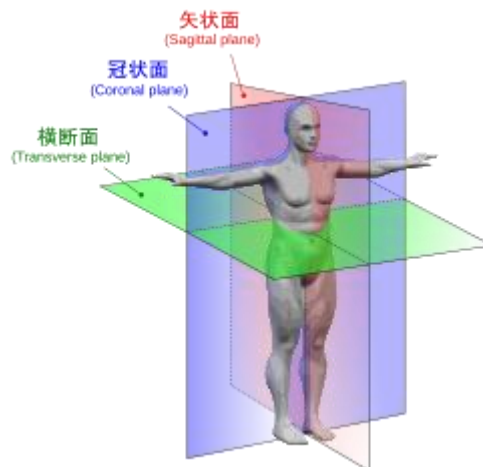


図17 人体における3つの断面名称とその位置
（矢状面は人体の正中線において、人体を左右に分ける面をいう）

身体の前倒シミュレーションにおける前倒プロセスの前提（実際の転倒との違い）は下記の通りである。

- 前倒プロセスと前倒姿勢
 - アニメーションは、下記①～③の間を等速運動と仮定して肢位や関節位置を移動させながら示す。
 - 前倒時の初速度は水平方向の外力として与える。
 - その後、等加速度運動であると仮定しているので、③の計算はそれによって行う。

〔9 研究結果（つづき）〕

- ただし、アニメーションはあくまでもイメージとしてとらえることから、等速運動として表示される。

①転倒開始時の姿勢、ならびに転倒時動作の回転位置（足先もしくは各関節のみ）を決定する。

②身体特定部位に、特定の水平方向からの外力が瞬間的に加わることにより、転倒が始まる。もしくは指定する一定の不安定姿勢からの自然転倒による。

③転倒において、最初に身体部位（頭部、各関節もしくは手の先端部、それ以外はないとした）の一部が床に着いた瞬間の、当該部位にかかる荷重とその二次元ベクトル（方向）が出力される。

- 転倒時の荷重負荷とその二次元ベクトルの計算の前提条件
 - 転倒開始時に②の外力が加わった瞬間は、関節位置も固定化された剛体とする。
 - ③の転倒後、最初に身体部位の一部が着床した瞬間は、関節位置も固定化された剛体とする。
- ③の転倒後の処理（いわゆる二次転倒、多重転倒）
 - 実際には、身体部位の一部が床に着いて（a）、なおその後、別の部位が床に着く（b）可能性があるが、本シミュレーションでは（a）においてシミュレーションを中止している。その理由として、
 - ✧ 転倒時の荷重による衝撃後、（a）→（b）へ至るプロセスが、人体を剛体とした計算方法では算出できない。
 - ✧ 荷重負荷は、着床時（a）≫着床時（b）であることから、（a）を求めることのみに特化しても本研究の目的はある程度達成できる。
 - ✧ その場合、（a）、（b）をそれぞれ独立して計算できる。その場合、（b）の荷重は（a）の肢位を転倒開始位置とし、（a）における転倒時の外力を参考として、手動で特定の部位に、特定の2次元ベクトルからの外力が瞬間的に加わる力を入力し→（b）へ至るときに発生する（b）の荷重を出力させるという方法で、ある程度の概算ができる。
- ユーザーインターフェース
 - 入力情報（1）人体データ（人体各肢の寸法と重さ）
 - ✧ フォーマットされたエクセル形式でアップロード、ならびにシミュレーション実施時に手入力する画面上※における入力（エクセルによりアップロードしたデータは、画面上※にも示される）。
 - 入力情報（2）シミュレーション転倒の初期値（画面上※における入力）
 - ✧ 力を加える位置（高さ）と、瞬間的に加える力、転倒時の回転中心位置
 - 出力情報
 - ✧ 画面表示される他に、上記（1）（2）の内容の他、下記情報（二次元座標情報）とともに、シミュレーション後にダウンロード（CSV形式）して保存できる。
 - ✓ 開始時の肢位
 - ✓ 床に着く（転倒終了）時の肢位