

博士学位論文

健康弱者の自立歩行を支援する手摺収納式
引き戸装置の強度設計と製品開発

2021年6月

九州工業大学大学院工学府 博士後期課程

工学専攻 機械・宇宙工学領域

斉藤 金次郎

第 1 章 緒 論

1.1 研究背景

1.2 高齢者の自立歩行を支援する歩行補助具の有効性

1.2.1 手 摺

1.2.2 杖

1.2.3 歩行器

1.2.4 歩行車

1.2.5 パワードスーツ

1.2.6 歩行機能支援に適した歩行補助具

1.3 本論文の目的と構成

第 1 章参考文献

第 2 章 人間工学に基づく設計条件

2.1 緒 言

2.2 人間工学に基づく各部の寸法

2.2.1 手摺の設置高さ

2.2.2 引き戸開口寸法と手摺の納まり寸法

2.2.3 握りやすい手摺棒の直径

2.3 高齢者に適した持ち手形状と引き戸の初動開口力および最大開口力

2.4 本開発品の強度設計に用いる荷重

2.4.1 人の転倒時荷重の計測装置および計測条件

2.4.2 人の転倒時荷重

2.5 本開発品の設計仕様

2.6 モニタリングによる本開発品の評価

2.6.1 高齢者（女性）のモニタリング

2.6.2 足に障がいを持つ男性のモニタリング

2.6.3 モニタリングによる本開発品の評価

2.7 結 言

第 2 章参考文献

第 3 章 開口力メカニズムの解明

3.1 緒 言

3.2 従来技術とその問題点

3.3 論文に用いる記号と引き戸装置の構造

3.3.1 引き戸装置の構造

3.3.2 記号および設計諸元

3.4 引き戸開口力の解析

3.4.1 収納式引き戸の力のつり合いと開口力の導出

3.4.2 ガイドレールの形状と引き戸開口力

3.4.3 引き戸最大開口力挙動の考察

3.5 試作品の形状と開口力

3.5.1 手摺支点の高さの差 Δ_{AB} と最大開口力 F_{Axmax} の関係

3.5.2 ガイドレール形状の決定—安全のために初動開口力 $F_{Ax}(x_A \leq 10\text{mm})$ を大きくする

3.6 手摺高さを持ち手高さの人間工学的条件を満足し、持ち手の挟み込みを防ぐ曲線手摺の提案

3.6.1 真っ直ぐな手摺棒の手摺高さとし、持ち手との干渉

3.6.2 持ち手の挟み込みを防ぐ曲線手摺の提案

3.6.3 手摺収納式引き戸の繰り返し開閉試験

3.7 引き戸最大開口力の低減化とその考察

3.7.1 曲率半径 R3 による最大開口力 F_{Axmax} の低減

3.7.2 回転支点 A に対するガイドローラー B の高さの差 Δ_{AB} による最大開口力 F_{Axmax} の低減

3.8 結 言

第 3 章参考文献

第 4 章 木質材料の破断強度と疲労強度の見積り方

4.1 緒 言

4.2 木質系構造用材料の基本的性質

4.2.1 構造用製材の性質

4.2.2 構造用合板の性質

4.3 構造用材料に対する建築設計と機械設計の強度評価方法

4.3.1 破断強さ σ_B に相当する「基準強度特性値 oF (建築設計)」

4.3.2 環境劣化を考慮した破断強さに相当する「基準材料強度 F (建築設計)」

4.3.3 疲労限 σ_w に相当する「基準許容応力度 of (建築設計)」

4.4 日本と米国の木材の強度評価方法

4.4.1 ASTM and AIJ における 繰り返し荷重下の木質材料の allowable stress の 見積り方法の比較

4.4.2 Adjustment factor , Degradation Factor, Safety factor

4.4.3 Strength ratio

4.4.4 Seasoning adjustment

4.4.5 Environmental coefficient

4.4.6 Special factor

4.4.7 Product of coefficients equivalent to ratio of fatigue limit to static strength

4.5 構造用合板における疲労限の一考察

4.5.1 木材の疲労限

4.5.2 構造用合板における疲労限の考察

4.6 建築設計用語の機械設計との対比と事例

4.7 引き戸に使用した構造用合板一級材の強度性能値

4.8 結 言

付録 木材用語

第 4 章参考文献

第 5 章 収納式引き戸の応力解析と木質材料の強度特性に基づく強度解析

5.1 緒 言

5.2 試作品を用いた引き戸開口力の実測とシミュレーション

5.2.1 引き戸装置の構造

5.2.2 引き戸開口力の実測とシミュレーション

5.3 引き戸木材部の強度解析

5.3.1 木材の機械的性質と応力解析方法

5.3.2 最大応力に対する強度評価

5.3.3 疲労に対する強度評価

5.4 引き戸の耐久性に関する実験的検討

5.4.1 繰返し開閉試験の方法および試験結果

5.4.2 繰返し荷重試験の方法

5.4.3 繰り返し荷重試験結果

5.5 結 言

第 5 章参考文献

第 6 章 結 論

謝 辞

第1章 緒 論

1.1 研究背景

日本は、人口に占める高齢者の割合が増加する「高齢化」と、出生率の低下により若年者人口が減少する「少子化」が同時に進行する少子高齢化社会となっている。団塊の世代が全て 75 歳となる 2025 年には、75 歳以上人口が全人口の 18%となる。その後、現在のペースで少子高齢化が進むと、2060年には人口が 8600 万人に減少する一方、長寿命化時代を迎え 75 歳以上人口は、全人口の 27%になる。これは、何らかの介護を必要とする高齢者が今よりもさらに増加することを意味している。

ここで、図 1-1 に秋山による高齢者の自立度の変化パターンを示す[1]。この図は、全国の住民基本台帳から 60 歳以上の住民 5715 人を無作為に抽出し、25 年に亘る追跡調査で高齢者の自立度の変化を調べたものである。縦軸に自立度合いを 0~3 で示し、横軸に年齢を示している。自立度合い 3 は、自立した生活を維持している状態であり、自立度合い 2 は、手段的日常生活(IADL ; Instrumental Activities of Daily Living)の「料理、洗濯、買い物などの家事や交通機関の利用、電話対応などのコミュニケーション」に援助が必要となる段階である。自立度合い 1 は日常生活における基本的な「起居動作、移乗、移動、食事、更衣、排泄、入浴」動作(BADL ; Basic Activities of Daily Living) に援助が必要な段階を示しており、自立歩行ができないことを意味する。秋山は、男性は 3 つのパターンに分類されるとしている。すなわち、最後まで自立した生活を送れるパターン A、70 代半ばから緩やかに自立度合いが低下するパターン B、60 代前半から急激に自立度合いが低下するパターン C の 3 つである。パターン A は男性に限られるもので、パターン B と C は男女に共通した傾向である。この図から、男性の 70.1%、女性の 87.9% がパターン B であり、男女ともに 70 歳を過ぎて緩やかに自立度が低下しはじめ、80 代で BADL に援助を必要とするようになっていることが分かる。人生 100 年時代を迎えるにあたり、この状況を少しでも先送りし、就労を含めて高齢者が自立できる期間を長くする社会づくりを目指し、住み慣れたところで暮らし続けられる生活環境を整備するための施策が介護保険法等により行われている。

図 1-1 において、自立度合い 1 の BADL の援助が必要となる前に何らかの対策を取り、身体機能の低下を止めることが重要である。歩行動作の獲得は日常生活の活動範囲を拡大する上で重要であり、その

ため臨床においても、歩行自立度の改善を目標とした理学療法プログラムの立案を行うことが多い。下肢機能低下を原因とした移動能力の低下に伴い、ADLの制限が進行する。特に歩行自立の可否はADLに直接影響を与えている[2,3]。また、歩行自立した高齢者はADLの全項目で自立度が高く、歩行機能を維持・向上がADLを維持・向上させ。特に、移乗・入浴・階段は、歩行自立度との高い一致度を示し、歩行自立度の低下と、移乗・入浴・階段自立度の低下が同時期に生じる[3]。要介護状態となった高齢者は、一人で外出することが困難になり、屋内での安定した歩行望む高齢者が多くなる[2]。以上、自立歩行の維持が、健康寿命の維持に効果的であることがわかる。また、高齢者が加齢に伴い体力が減衰していく段階で、まだ幾分でも自力歩行が可能な時期に、歩行機能の減退防止の対策を取ることができれば、歩行機能を維持・回復させることもできる[4, 5, 6]。

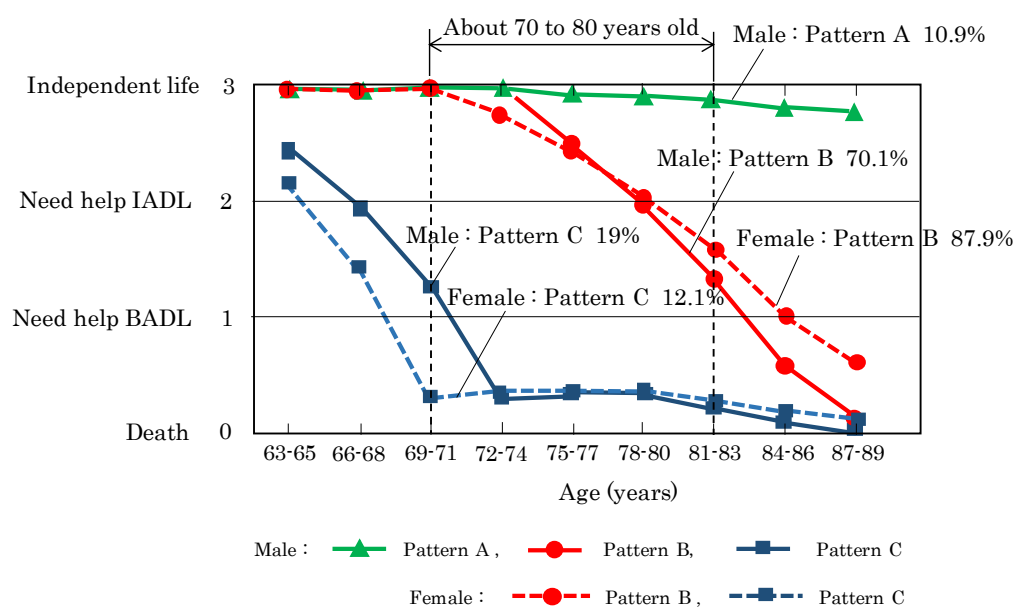


Fig. 1-1 Pattern changes in independence of elderly in Japan [1]

そこで、屋内での歩行機能の維持・向上に有効的な補助器具として手摺が挙げられる。介護が必要とされる高齢者、障がい者、いわゆる「健康弱者」用の住宅や介護施設、病院等においては、介護者なしでもつかまり歩きができるように、図 1-2 に示すように廊下全長にわたり手摺が装着されている。しかし、廊下の途中に引き戸がある場合、引き戸の合わさる面に手摺を装着すると引き戸の開閉ができなくなるため、通常の手摺は装着することができない。そのため、手摺がなく歩けない部分が出てしまい、

トイレや、浴室に一人で行くことに困難が生じる。自立生活をするには、手摺を途切れることなく連続して装着する必要がある。

本研究では、この引き戸の合わせ面に取り付けることの出来る自立歩行を支援する手摺収納式引き戸 [7, 8]を開発することを目標とする。本開発製品は、高齢者および障がい者に安心して歩くことのできる環境を与え、歩行意欲を高めることによって、歩行機能を回復させ、健康寿命の改善に貢献できる装置である。

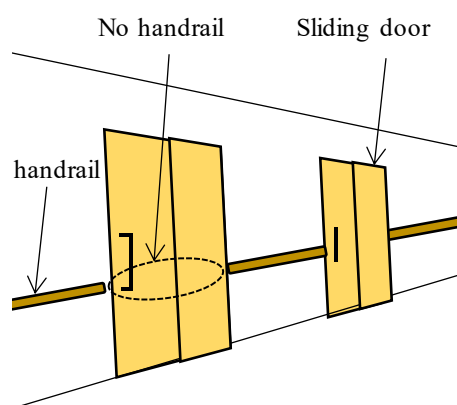


Fig. 1-2 Examples of sliding doors used in Japanese welfare facilities.

1.2 高齢者の自立歩行を支援する歩行補助具の有効性

高齢者・障がい者の自立歩行を支援する歩行補助具には、手摺、杖、歩行器、歩行車および近年盛んに研究されているパワースーツ等がある。中でも杖の歴史は古く、紀元前 2800 年代の古代エジプト王朝の石碑に杖を携えた尖足の成人が彫られている。近年に至り、障がいニーズへの社会的認識が高まり、リハビリテーション科学の発達、工学技術の応用、あるいは関連商産業の萌芽・成長などにもない杖や歩行補助具は急速に進歩した。とりわけ最近の素材や材質の開発、障害科学・人間工学の発達、生活のなかの意匠重視などにより、構造やデザインをはじめとする杖・歩行補助具の多種多様化がめざましい [9]。ここでは、それぞれの歩行補助具の性能を比較考察してみる。

1.2.1 手摺

図 1-3 (a), (b), (c), (d) に手摺の設置例を示す。手摺の機能として、次の 5 つが挙げられる。① 転倒防止、高齢者は少しの段差につまずき転倒し易い。手摺に掴まり身体を支えることができ、転倒を防止できる。② 転落防止、階段で手摺に掴まり昇降することで、転落防止と足腰への負担軽減につながる。③

歩行補助，体力の衰えとともに歩行による身体の負担も大きくなってくる．手摺に掴まることで負荷が分散し歩きやすくなる．介護施設では歩行機能訓練の一環で手摺掴まり歩行が採用されている．④ 立ち上がり補助，トイレで便座からの立ち上がりや，玄関で靴を履いた後の立ち上がり等の動作がし易くなる．⑤ 起き上がり補助，ベッドや布団から起き上がる動作は高齢者にとって負担であり，手摺に掴まり起きすることで負担が軽減出来る[10]．また，手摺は，高齢者の自立歩行を支援する補助具として十分役立つばかりでなく，手摺を使用する高齢者本人以外に，介護する側の負担軽減にもつながる．

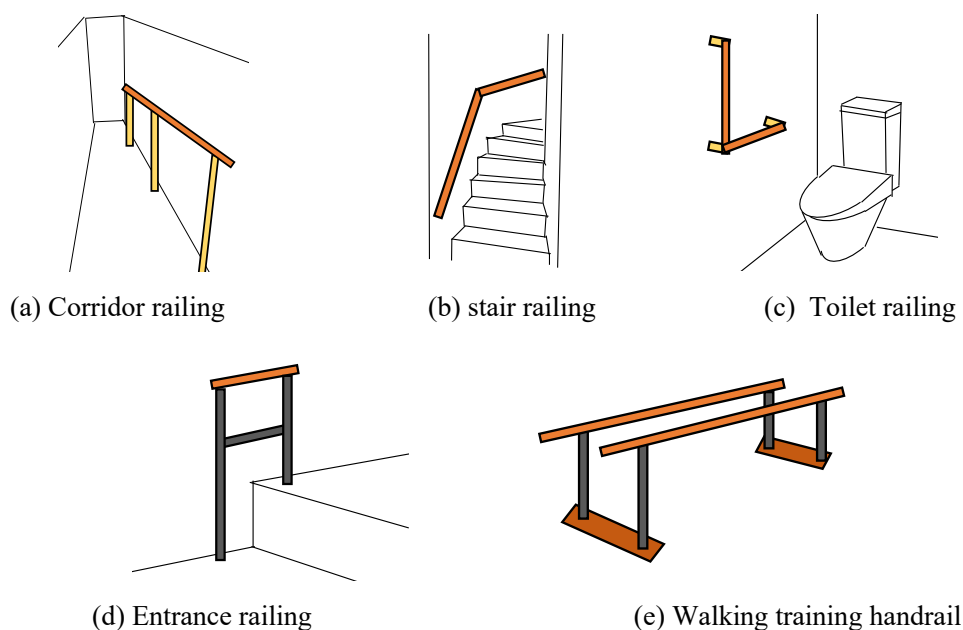


Fig. 1-3 Various handrails

1.2.2 杖

杖の役割は，免荷・バランスの補助・歩行リズムの 3 つの役割があるといわれている．免荷は，杖に体重を掛けると反対側の脚への荷重負担が減少すること，バランスの補助は，両足と杖の 3 点で身体を支持することで安定性が増すことである．そして，歩行が不安定になると「イチ」「ニ」「イチ」「ニ」というリズムで歩くことができなくなる．そこで杖を健側に持ち，杖、患側の足、健側の足の順番に動かし「イチ」「ニ」「サン」の三拍子のリズムでゆっくりと歩くと，歩く速度は遅くなるが安定したりリズムカルな歩行ができるようになる．杖は，腕の腕力があり，自立歩行できる高齢者の補助になるという表現もある[11, 12]．

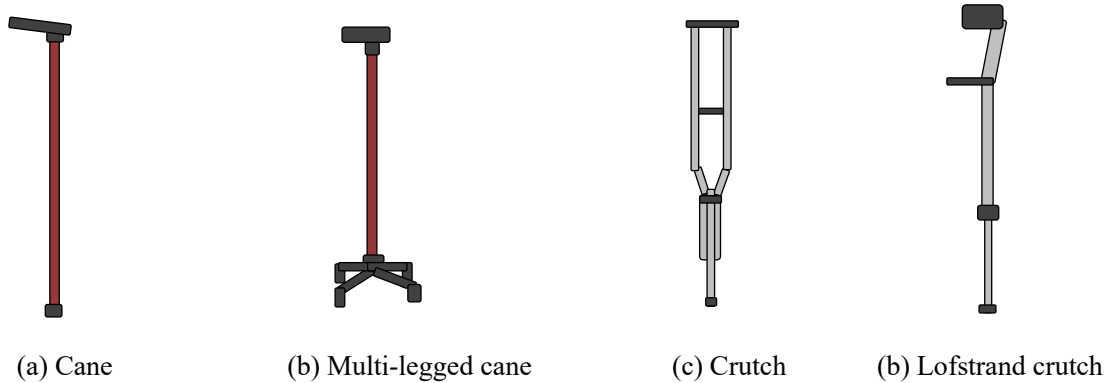


Fig. 1-4 Various canes

図 1-4 (a), (b), (c), (d) に各種杖を示す。(a) の杖は、免荷がわずかであるが、歩行リズムを保つことができる。(b) は、多脚杖と呼ばれ、3 本から 5 本に分岐した床面に接する脚がある。この多脚により、安定性が向上し、転倒の危険性が低減するので、転倒予防に有効である。(c) は、医療で使用される松葉杖である。概ね患側にかかる重量は体重の $2/3$ といわれている。(d) は、ロフストランド杖である。1 本の脚と、体重を支える握り、前腕を支えるカフを備えている。ロフストランド杖を片側について歩くと概ね患側に体重の $2/3$ を掛けることができる[11, 12]。

1.2.3 歩行器

図 1-5 に示す歩行器は、四脚のフレーム構造の歩行補助具である。使い方の手順は、まず両足を揃えて歩行器の前に立ち、歩行器を両手で歩行器の脚を少し浮かす程度に持ち上げ、前進する方向へずらす。次に患脚を前に出し、その後に健脚を進め、両足立ちになり、歩行器に体重を掛け掴まり立ちする。この動作を繰り返し行って、前進歩行を行う。四脚歩行器は、下肢の筋力低下により杖では歩行が不安定な人に適している。移動の際は、歩行器を持ち上げなくてはいけないので、上肢機能がある程度維持されている方でなければ使用できない[11, 12]。

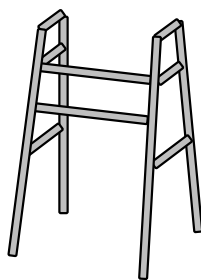


Fig. 1-5 Walking frame

1.2.4 歩行車

図 1-6, 図 1-7 に歩行車を示す. 図 1-6 に示す歩行車は, 四脚歩行器に車輪を付けたもので, 前輪は自在輪, 後輪は固定輪となっている. 軽く押しながら歩行することが可能で, ハンドグリップに手動ブレーキが付いており, ブレーキをかけながらスピードを調節することができる. この歩行車は, 下肢の筋力低下で, 自立歩行が不安定であるが, ある程度の自立歩行ができ, ブレーキレバーを握る握力のある人が対象である. 車輪走行のため, ブレーキのタイミングを外すと歩行車の先走りで転倒の恐れがある.

図 1-7 に示す医療用歩行車は, 足腰や股関節に痛みがある人, 腕と脚の筋力が弱くバランス感覚が低下している人, 麻痺や障害などにより自立歩行が困難な人に適している. 上半身を歩行車に乗せかけて使うため, 腰や膝にかかる負担を軽減し, 歩行姿勢を安定させることができる[11, 12].



Fig. 1-6 Wheel rollator



Fig. 1-7 Medical walker

1.2.5 パワードスーツ

パワードスーツは, 人が装着することで動作や姿勢へのアシストが得られる機器であり. 身体的能力を補助・強化することが出来る. 高齢者の歩行支援やリハビリなどにも活用できる. 2012 年には下半身がまひした英国の女性がパワードスーツを装着してロンドンマラソンを完走したという例もある. また, 介護者が要介護者をベッドから車椅子などへ移る動作をサポートする際に着用して, 身体的負担を軽減して腰痛などを防ぐことができる. まだまだ研究の段階であり, 高価である. 今後の研究が期待される. 現段階で, すでに商品化されたパワードスーツに, ロボットスーツ HAL, マッスルスーツ Every がある.

1.2.6 歩行機能支援に適した歩行補助具

歩行能力には, 年齢, 筋力, 関節可動域, 運動制御, 固有感覚などが影響し, 姿勢の反射や制御の関与はあるが, バランス能力と下肢の筋力が歩行能力に大きく影響する[13, 14]. また, 杖や歩行器などの歩行補助具を使用するには, 相応の上腕の筋力が必要である. そこで, 図 1-9 に, 前項で説明した歩行

補助具を使用する上で必要とされるバランス能力と四肢の筋力の強さに相当するところに、それぞれの補助具を配置した[15]。図 1-9 の縦軸は、補助具を使用する上で必要とされるバランス能力である。同様に、横軸は必要とされる四肢の力である。バランス能力とは、静止姿勢または動的動作中の姿勢を任意の状態に保つ、また不安定な姿勢から速やかに回復させる能力を意味する。つまり、バランス能力とは、静止または動的動作における姿勢維持の能力のことで、この能力は感覚系・中枢司令系・筋力系などの要素によって決まるものである[16]。

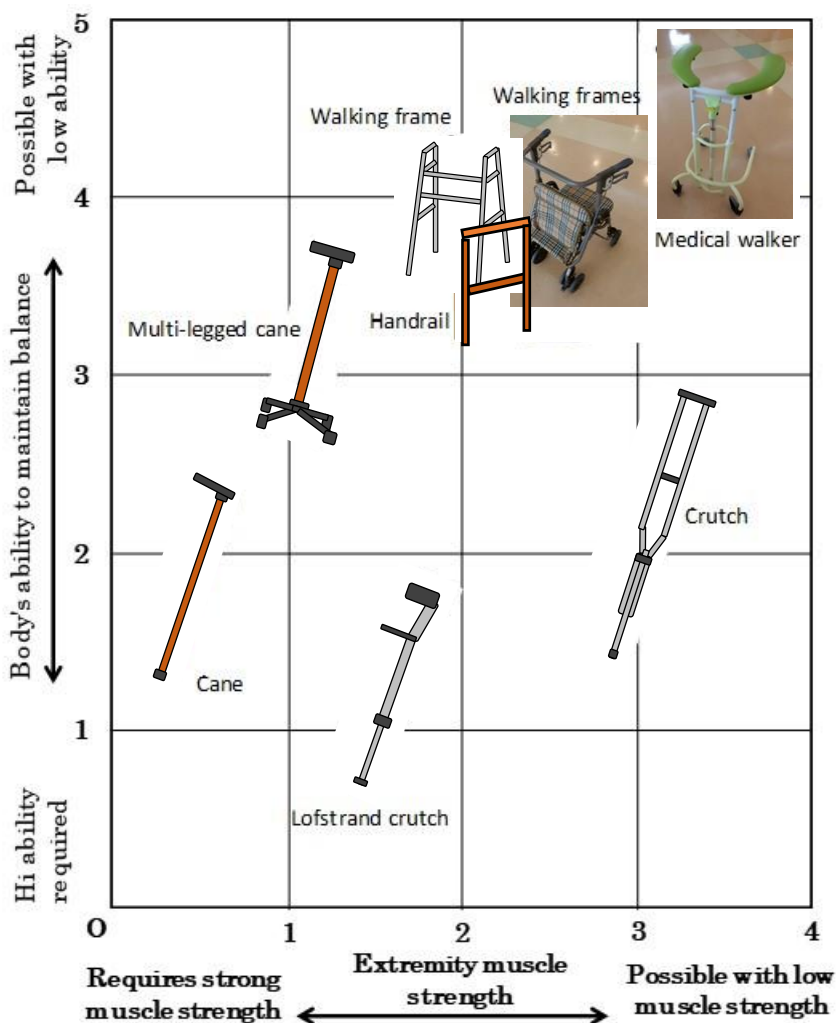


Fig. 1-9 Comparison of walking aids based on muscle strength and balance function [15]

ここで、歩行機能支援にどの歩行補助具が適するものかを図 1-9 で確認する。杖は、種類によって必要な筋力とバランス能力の大きさが異なるが、ここに挙げた補助具の中では、最も筋力とバランス能力が必要とされる。手摺と歩行器および歩行車の筋力とバランス能力は、ほぼ同程度であり、杖に比べて

小さく、身体を支える力と自立保持できる筋力があれば使用できる。歩行器と歩行車は、手摺のない部屋の至るところを歩行できるメリットがある。しかし、歩行器を持ち上げる動作は、バランスを崩し転倒する恐れがある。また歩行車はブレーキが遅れた場合に転倒する危険性がある。通常日本家屋に多い敷居などの段差が歩行器および歩行車の通行の妨げとなり、屋内の使用には不向きである。それに対して、手摺は廊下の壁やトイレおよび浴室など至るところに取付けられ、屋内での生活導線を確保できる。また、転倒防止・転落防止・歩行補助・立ち上がり補助・起き上がり補助の 5 つの機能を持つことから、手摺は歩行支援に適した歩行補助具であると言える。医療用歩行車は、筋力、バランス能力の両方が低下した場合でも使用できる。しかし、狭い場所や段差がある場合での使用が難しいことから、病院および施設以外の一般家屋での使用には適さないとすることが妥当である。

1.3 本論文の目的と構成

本論文は、本開発製品を取り巻く状況、高齢者に適した手摺の最適形状と寸法および手摺に掛かる最大荷重、高齢者に適した引き戸開口力と本開発製品の開口力メカニズムの解明、引き戸木材の疲労強度の見積、引き戸最弱部の強度解析および本開発製品の耐久試験について以下の 6 つの章から構成されており、その各章は以下のようになっている。

第 1 章では高齢者の耐力減衰傾向と健康弱者を取り巻く住居環境と自立歩行の必要性を説明している。自立歩行を行うには、廊下等に手摺が連続してあることが必要であり、日本家屋の廊下では、部屋への出入口に設置される引戸やドアによって手摺が分断され自立歩行を妨げている。現行商品でこれを解消できる引き戸手摺がなく、健康弱者の自立歩行の支援ができていないという問題を提起している。

第 2 章では本開発品の設計仕様を著している。まず、人間工学に沿った高齢者に適した使い易さを調査して、手摺の設置高さ、握りやすい手摺棒の径等の手摺形状寸法と、高齢者に望ましい引き戸最大開口力が 20 N 以下であり、且つ初動開口力が 5~10 N であることを明らかにしている。また、転倒時に手摺を掴みその手摺が受ける荷重の測定実験データから手摺荷重 50 N の設定経緯を示している。本開発品のモニタリングテストの結果、歩行機能が減退して歩行助成を受けていた高齢女性が、単独自立歩行ができた実例を示し、本製品が高齢者および障がい者の歩行機能の回復に有用であることを立証した。

第 3 章では本開発製品の開口力のメカニズムを解明し、引き戸開口力の計算値と実験値を比較して両者の誤差が 13%以内で一致することを明らかにしている。また、最大開口力においては、手摺端部の回転ローラーがガイドレールの曲線終端部と垂直直線部との交点近傍に来たときに開口力がピーク値を持つ特性があることを解明している。更に、初動開口力が低すぎることも高齢者に危険であることから、初動開口力を 5 N にできた経緯を説明している。引き戸の持ち手と手摺の位置を人間工学に基づいて設定したところ、引き戸全開時に持ち手と手摺干が干渉する問題が発生したが、収納時に、手摺バーが引戸引手とガイドレールとの間に平面上同列位置になるため、把持した掌を挟まないような空間を確保する機能上の視点から派生した曲線手摺を考案し、これを解決している。さらに、開口力に及ぼす引き戸装置手摺の支点位置の影響と、手摺材質の違いによる影響を定量的に考察し、目標開口力を達成出来ることを明らかにしている。それにより高齢者および障害者に使いやすい手摺収納式引き戸装置を具現化した。

第 4 章では、本開発製品が機械製品の一種であるとみなし、機械設計の見地から木材の破断強度と疲労強度の見積方を明らかにした。木質製品の強度設計に使う材料強度の設定値が、建築設計の規準書に記載されている。しかし、その値の根拠が示されてなく、機械設計に使用する破断強さと疲労強度が明らかにされてないという問題があった。そこで、建築設計の木材強度計算式を考察するとともに、木材疲労研究の文献を調査して、建築設計で用いる木材の基準強度特性値が破断強さに相当することと、基準許容応力度が疲労限 σ_w に相当することを明らかにした。これによって、日本建築学会(AIJ)と ASTM のデータから耐久比 σ_w/σ_B に相当するもの（疲労限と静的強度の比）の算出方法を示した。特に、曲げ耐久比 σ_w/σ_B^B と引張り耐久比 σ_w/σ_B^T は AIJ 採用し、圧縮耐久比 σ_w/σ_B^C は ASTM を採用することが安全に評価できることを示した。

第 5 章では、本開発製品を使用する過程で、最も危険であると考えた手摺棒取付金具周辺での引き戸木材の安全性の FEM 解析を行い、手摺棒取付金具のボルト穴周辺部に最大引張主応力と最大圧縮主応力が生じることを明らかにしている。合板の強度性能値により、最大応力に対する強度評価を行い安全であることを確認した。本開発製品の 20 万回の繰り返し開閉試験と取付金具に所定の負荷を掛けて行った繰り返し荷重試験では、所定の繰り返し回数で使用上問題となる損傷が生じることなく、十分な耐用性があることを確認した。

第6章は総括であり、本研究で得られた主要な結論を要約している。

第1章参考文献

1. 秋山弘子：長寿時代の科学と社会の構想，科学，岩波書店，Vol. 80, No.1 (2010, 1) pp. 59-64
2. 杉本 諭，大隈 統，古山つや子，中城 美香：要介護高齢者の歩行自立度の違いに関わる要因の検討，第50回日本理学療法学術大会抄録集，42, 2(2014) p. 1078
3. 熊谷 謙一，山内 康太，島添 裕史，鈴木 裕也：高齢者の歩行自立度がADLに与える影響，第47回日本理学療法学術大会抄録集，39, 2(2011) p. 846
4. 平成18年度厚生労働省老人保健健康増進等事業報告書．地域在宅高齢者に対する歩行支援プログラムの健康増進効果に関する研究, p. 29
5. 金憲経，吉田英世，鈴木隆雄，石崎達郎：高齢者の転倒関連恐怖感と身体機能—転倒外来受診者について—，日本老年医学会雑誌,38, 6(2001), p. 805
6. WHO Global Report on Falls Prevention in Older Age : WHO Library Cataloguing-in-Publication Data ISBN 978 92 4 156353 6 (NLM classification:WA 288), p. 20
7. ケイ・プロダクツ株式会社，引き戸用手摺，引き戸装置，特許出願 2010-102602，公開番号 2011-231513
8. ケイ・プロダクツ株式会社，引き戸用手摺，引き戸装置，特許出願 2012-133492，公開番号 2013-256808
9. 田中敏明，小島悟，最近の杖と歩行補助具 橋本伸也，札幌医科大学保健医療学部理学療法学科，理学療法ジャーナル第31号，5号(1997，5) pp. 313-315
10. ユニマットリタイアメント・コミュニティ “介護用品の手すりの選び方3つのポイント！種類や介護保険、事例も解説”，<https://www.unimat-rc.co.jp/media/handrail>，(参照 2021-06-13)
11. 財団法人テクノエイド協会 “歩行補助用具の活用，福祉用具シリーズ Vol. 12”，<http://www.techno-aids.or.jp/research/vol12.pdf>，(参照 2021-6-13)
12. 市川 洌、加島 守、吉川和徳，“福祉機器 選び方・使い方 2007 はじめてのベッド、リフト等 移乗用品、杖・歩行器、車いす”，財団法人保健福祉広報協会，

https://www.hcr.or.jp/cms/wp-content/uploads/howto2019_1.pdf, (参照 2021-6-13)

13. 猪飼哲夫, 辰濃尚, 宮野佐年: 歩行能力とバランス機能の関係, リハビリテーション医学, 43(2006) pp. 828-833
14. 西島智子, 小生理恵子, 内藤郁奈, 畑山聡: 高齢患者における等尺性膝伸展筋力と歩行能力との関係, 理学療法科学, 19, 2(2004) pp. 95-99
15. アビリティーズ・ケアネット(株) “歩行器・杖類の種類と選び方_福祉用具の種類と選び方_こんな時に”, <https://my.abilities.jp/lifecase/fukusiyougu-guide/hokouki-stick/>, (参照 2021-06-13)
16. 厚生労働省 “e-ヘルスネット バランス運動の効果と実際”, <https://www.e-healthnet.mhlw.go.jp/information/exercise/s-04-009.html>, (参照 2021-07-28)

第2章 人間工学に基づく設計条件

2.1 緒言

介護が必要とされる高齢者、障がい者、いわゆる「健康弱者」用の住宅や介護施設、病院等においては、介護者なしでもつかまり歩きができるように、廊下全長にわたり手摺が装着されている。健康弱者の自力歩行が可能な時期に、歩行機能の減退防止の対策がとられた場合、対象者の歩行機能を維持し、回復させることができる[1, 2, 3]。しかし、部屋への出入口に設置される引戸やドアが廊下の途中にある場合、通常の手摺は装着することができず、そのため、手摺がなく歩けない部分が出てしまう。自立生活をサポートするには、手摺を途切れることなく連続して装着する必要がある。この観点から本研究では、健康弱者が使いやすく、彼らの自力歩行を支援する手摺収納式引き戸[4, 5]の開発を目標とする。

開発する手摺装置は、形状寸法的にも、引き戸開閉操作においても、高齢者にとって使いやすいものでなくてはならない。そこで、形状寸法においては手摺の高さ、手摺棒の直径、開口操作においては引き戸を開閉し易い持ち手の形状、高齢者が開けやすいと感じる開口力、そして手摺に必要な強度を人間工学の観点から求め、設計条件として定義する。

歩行機能が減退して歩行助勢を受けている高齢者と、手摺若しくは、杖なしでは歩行困難な障がい者を対象に、この条件で設計した本開発品のモニタリングテストを行い、操作性および機能が満足されるものであるか、また高齢者および障がい者の歩行機能の低下の抑制に有効であるかを検証する。

2.2 人間工学に基づく各部の寸法

前章 1.1 節より、男女ともに 70 歳ころから緩やかに自立度が低下しはじめ、80 代で BADL に援助を必要とし、自立歩行が困難になっていることが認められる。自立度は低下しているが、自力で立ち、手摺の伝い歩きや介助歩行ができる時期に歩行環境が整備されれば、高齢者が、歩行機能を回復できる。従って、本開発品を使用する対象年齢を、歩行機能が低下を始める 70 歳から、自立歩行が困難となり始める 80 歳とする。そして、高齢者が安全で、使いやすいものになるように、その年齢層に適した装置各部の設計条件を、人間工学に基づいて設定する。図 2-1 に手摺収納式引き戸装置(以下、本開発品とする)

の概略図および各部の主要寸法を示す。手摺棒の高さ h_R 、手摺棒の直径 d 、持ち手の高さ h_{BH} 、引き戸開口幅 W_{OP} 、手摺長さ l 、機長 L および引き戸開口力 F_{Ax} は、人間工学的観点から決まる設計条件である。

2.2.1 手摺の設置高さ

高齢者に適した手摺高さは、国土交通省の長寿社会対応住宅設計指針の補足基準に 750mm を標準とすることが明記されている[6]。しかし性別や身長の違い等を考慮すると、750mm の高さが全ての人にとって適した高さとは限らない。そこで、高齢者が持ちやすい高さがどのくらいであるかを、人間生活工学研究センターが調査を行っている[7]。調査に使用したテスト装置を図 2-2 に、また、被験者の性別、年齢別の人数および身長を表 2-1 に示す。尚、表中の身長は、厚生労働省“平成 30 年国民健康・栄養調査報告書”によるものである[8]。このテスト装置は、2 本のスタンドに水平に手摺パイプを固定して、手摺パイプを高さ 650 mm～2600 mm の範囲で上下に位置調整できるように設置したもので、手摺の直径は 35 mm である。ここでは、手摺高さ 750 mm に対する感じ方の試験と、手すりの高さを変えて、ちょうど良い高さを被験者に判断してもらう二つの試験を行っている。「ちょうどよい手すりの高さ」を求める試験では、まず「低めで持ちやすい高さ」、「高めで持ちやすい高さ」を決めてもらい、最後に「ちょうど良い高さ」を調整して決めてもらい、正しい「ちょうど良い高さ」を求められるようにしている。手摺の床面からの高さ測定位置は、手摺パイプの上面である。

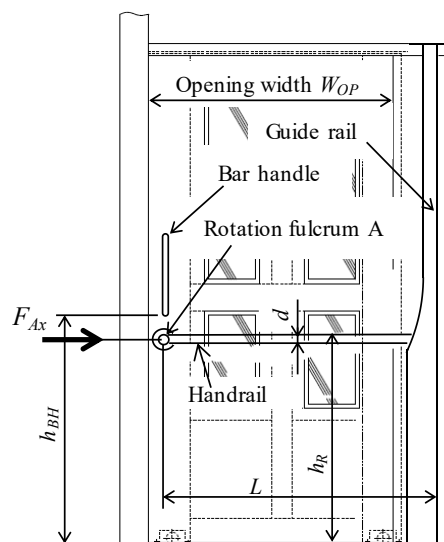


Fig. 2-1 Outline of sliding door equipment with retractable handrail

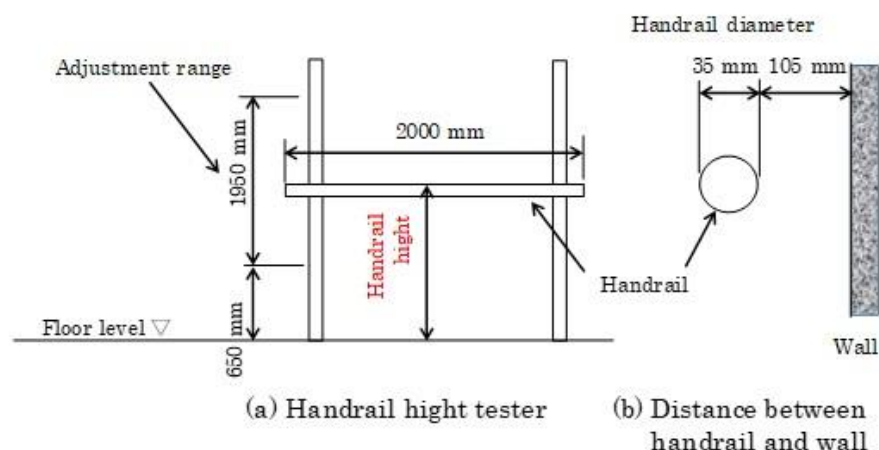


Fig. 2-2 Handrail height measuring device [7]

まず、手摺高さ 750 mm に対する試験結果を図 2-3 に示す。750 mm の高さの手すりに対しては、男性は若年者ほど低いと感じ、高齢者でもやや低いと感じている。女性は 20～50 代はやや低いと感じているが、60 代以上になるとちょうどよいと感じている。

次に、「ちょうど良い高さ」の試験結果を図 2-4 に示す。70 歳以上の男性高齢者の場合の「高めで持ちやすい高さ」から「低めで持ちやすい高さ」の範囲は、730～820 mm である。「ちょうど良い高さ」は、780 mm である。同様に 70 歳以上の女性高齢者の場合、「高めで持ちやすい高さ」から「低めで持ちやすい高さ」の範囲は、710～800 mm である。「ちょうど良い高さ」は、760 mm である。表 2-1 より、70 代、80 代の男性と比較して、女性は、5～10cm 身長が低いため、手摺を持ちやすい高さも低くなっていると考えられる。また、男性、女性とも共通して、若年者になるに従い、高めが持ちやすい高となっている。以上より、手摺高さの設計条件は、70 歳以上の女性高齢者の持ちやすい高さの

$$710 \text{ mm} \leq h_R \leq 800 \text{ mm} \quad (1)$$

とする。国土交通省の長寿社会対応住宅設計指針の補足基準に高齢者に適した手摺高さの標準 750 mm [6]は、式(1)の手摺高さ h_R のほぼ中間の値に相当している。

Table 2-1 Age and height of subject for handrail bar height measurement [7], [8]

Age (years)	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-
Male (number of people)	8	9	10	11	31	22	10
Male height (average) (cm)	176	175	163	166	164	163	160
Female (number of people)	10	12	12	16	32	24	6
Female height (average) (cm)	161	158	160	156	158	155	153

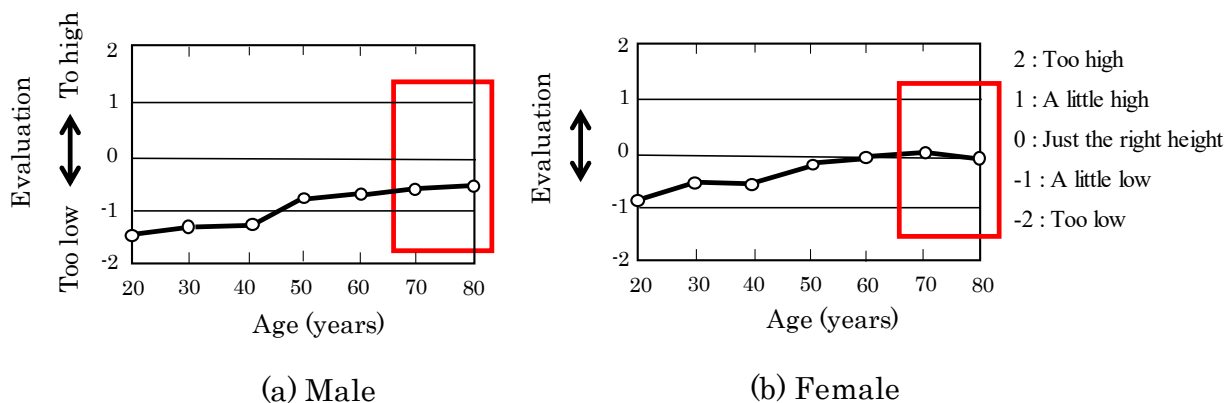


Fig. 2-3 Age-specific feeling for handrail height 750 mm [7]

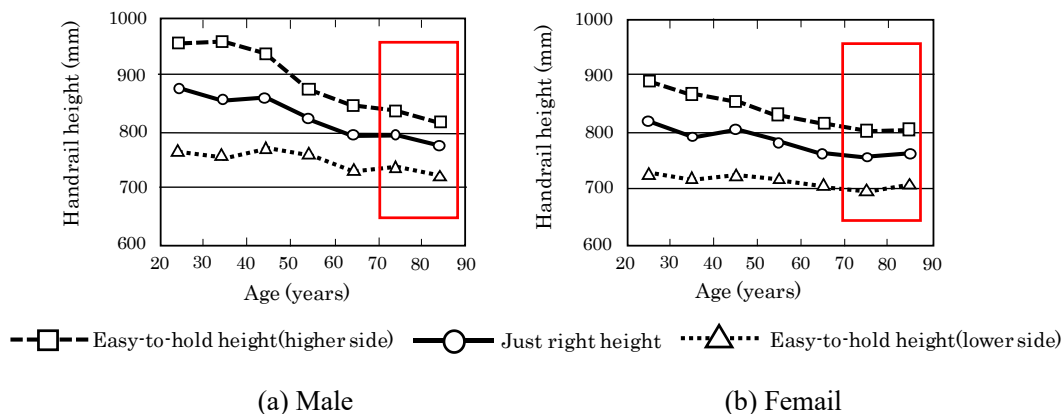


Fig. 2-4 Handrail height suitable for walking while holding on [7]

2.2.2 引き戸開口寸法と手摺の納まり寸法

手動車椅子の幅 630 mm以下、電動車椅子 700 mm以下と規定される車椅子で通行することを前提に、一戸建て住宅の通路有効幅寸法は、750mm以上であること、また、引き戸の有効開口寸法は、750mm以上であることと国土交通省告示の評価方法基準[9]に規定されている。手摺の納まり寸法は、建築基準法[10]により、100mm以下と規定されている。図 2 - 5 に一戸建て住宅の通路幅と手摺の納まり寸法を、図 2 - 6

に引き戸開口幅を示す。本開発品の引き戸開口寸法および手摺の納まり寸法の設計条件は、この規定に従うこととする。

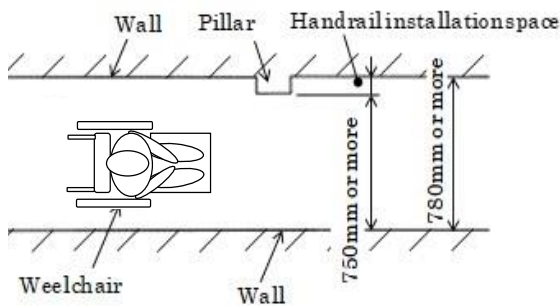


Fig. 2-5 Corridor width and handrail installation space

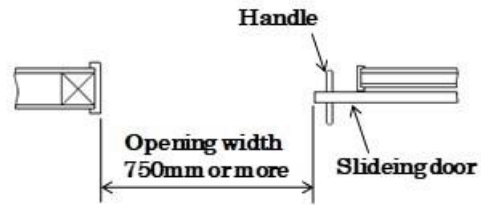


Fig. 2-6 Sliding door opening width

2.2.3 握りやすい手摺棒の直径

手摺を利用するときには使い易さを決める要因として、しっかり握ることができることが重要である。持ち手の形状は、全ての指先と手のひら全体が接触し、しっかり握ることのできる円筒形状が最も握りやすいとされている。[11, 12]ここでは、人間生活工学センターが行った円柱形手摺棒の「握りやすい太さ」試験[7]から、高齢者が握りやすい手摺棒の直径の設計条件を設定する。

試験は、薄いニス塗り仕上げの太さ 10mm～100mm までを 5mm 刻みで直径を変えた 19 本の木製丸棒に、被験者が立った状態で身体を預けるように順に木製丸棒を握ってもらい、その感じ方を採取する方法で行っている。その評価は、「これ以上太くなると握りにくくなる太さ」、「最も握りやすい太さ」、「これ以上細くなると握りにくくなる太さ」の 3 項目としている。図 2-7(a), (b) に測定結果を示す。図 2-7(c) に本試験の丸棒の握り方向を、表 2-2 に被験者の人数および年齢を示す。70 歳～89 歳までの高齢者男性の「最も握りやすい太さ」は、35mm である。これにより、本開発品の手摺棒直径 d の設計条件は、

$$32 \text{ mm} \leq d \leq 35 \text{ mm} \quad (2)$$

とする。

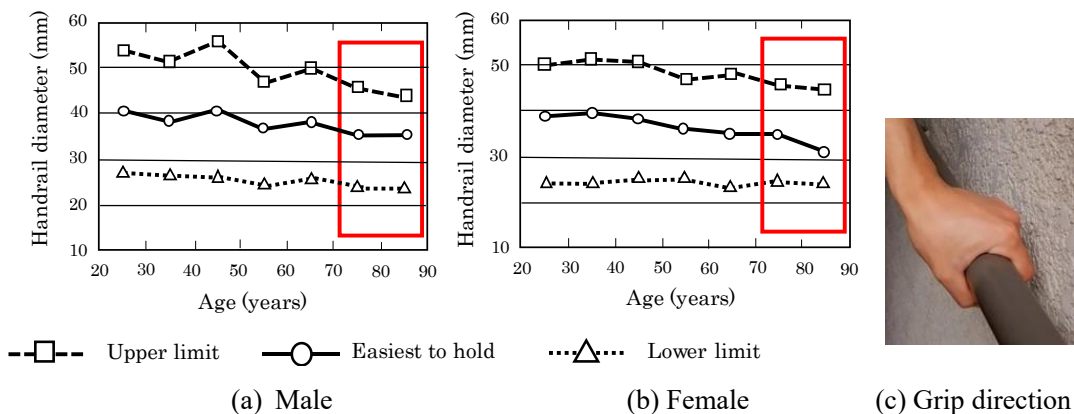


Fig. 2-7 Diameter of easy-to-hold handrail [7]

Table 2-2 Number and age of subjects who measured the diameter of the easy-to-hold handrail [7]

Age (year)	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89
Number of male	9	14	9	12	30	27	8
Number of female	10	9	10	15	29	24	4

2.3 高齢者に適した持ち手形状と引き戸の初動開口力および最大開口力

引き戸を開閉操作する場合、持ち手の形状の違いが開閉操作のしやすさに影響する。特に筋力が低下した高齢者の場合、その影響は大きいと考える。ここでは、田中等の研究[13]を元に引き戸を開閉しやすい持ち手の形状と高齢者に適した引き戸開口力の設計条件を設定する。

田中らは、実物大の実験引き戸を製作し、開閉力および操作部の持ち手を取り替えて、高齢の被験者が操作する際に感じた操作感覚を5段階で評価している。図2-8に実験装置の概要を示す。引き戸から滑車を介しておもりを付けて、左右水平方向に加力する。このおもりの調整で、引き戸開閉力を調整している。開閉力は、10N、20N、30Nの3段階である。図2-9(a)、(b)、(c)に操作部の持ち手を示す。この3種類の持ち手は、日本家屋で一般的に使用されているものである。図8(a)は、丸棒を握って操作するバーハンドルである。棒の直径は $\phi 25.4\text{mm}$ である。図2-9(b)は彫り込み形の彫り込み引き手であり、彫り込み部分の寸法は縦寸法100mm、横寸法30mm、深さ15mmである。図2-9(c)は、板に指先を掛けて操作する手掛け引き手で、指を掛ける板の寸法は30mmである。これらの操作部の長さ500mmのものを、図7の引き戸に取付けている。操作部の中心部の高さは、床面から900mmである。続いて、被験者の構成を表3に示す。ここでは、男性72歳~78歳、女性78~83歳の高齢者を抜粋して示す。人数、男

女それぞれ 5 名である。男女の体重差は、少ないが、握力差は大きく、女性の握力は、男性の 60% である。

図 2-10 に引き戸持ち手形状の違いによる開閉しやすさの官能評価測定結果を示す。「開けやすい」を 5、「開け難い」が 1 で、5 段階で高齢者の感じた開けやすさを記載している。開閉力 10N では、どの操作形状のタイプも大差ない。開閉力 20N では、バーハンドルと彫り込み形が開閉しやすく、さらに 30N では、バーハンドルのみが他と比べて、開閉しやすいつまれている。男女の握力差による差異は見られない。図 2-10 より、高齢者が最も開閉しやすい引き戸装置の持ち手は、バーハンドルであり、バーハンドルで開けやすいと感じられる引き戸開口力は 20N が最大であることが読み取れる。また、田中らは E. Grandjean の研究[14]を元に、引き戸の開け始めから開け終わるまでの開口力の推移を調べ、開け初めに生じる初動開口力を 5~10N、最大開口力 20N が高齢者に適した開口力であると結論づけている[13]。本開発品の初動開口力 $F_{Ax}(x_A \leq 10\text{mm})$ と最大開口力 F_{Axmax} の設計設計条件は、

$$5\text{N} \leq F_{Ax}(x_A \leq 10\text{mm}) \leq 10\text{N} \quad (3)$$

$$F_{Axmax} \leq 20\text{N} \quad (4)$$

とする。

また、バーハンドルの高さ h_{BH} の設計条件は、久保等の車いす利用者の使いやすい持ち手位置の研究[15]から、

$$850\text{ mm} \leq h_{BH} \leq 950\text{ mm} \quad (5)$$

とする。

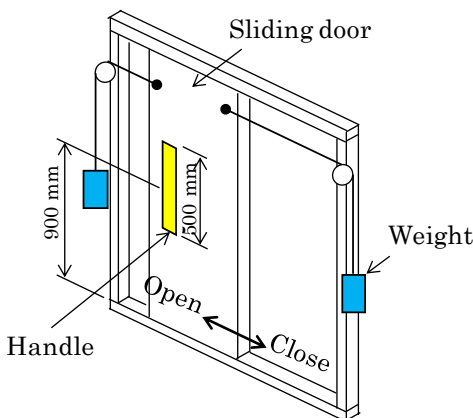


Fig. 2-8 Experimental equipment

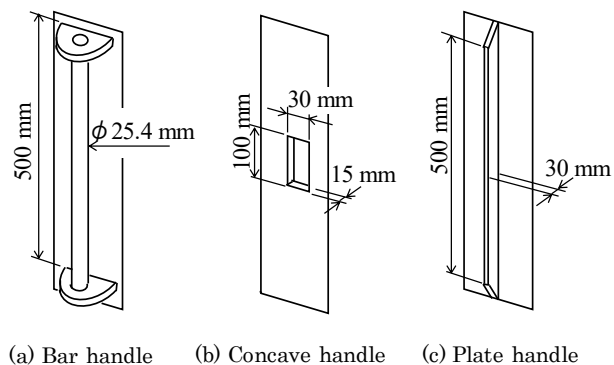


Fig. 2-9 Handle geometry

Table 2-3 Age and physical characteristics of subjects

	Age (years)	Number of subjects	Average weight (kg)	Average grip strength (N)
Male	72~78	5	59.8	312.6
Female	78~83	5	51.2	189.1

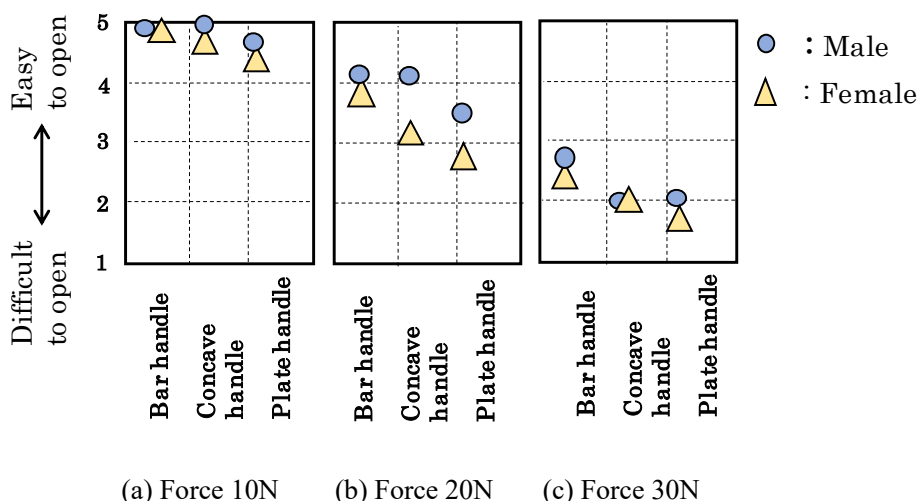


Fig. 2-10 Results of sensory evaluation

また、本開発品の開口幅の設計条件は、車いすの通行を考慮して定められた国土交通省告示[16]に従い、

$$W_{OP} \geq 750 \text{ mm} \quad (6)$$

とする。

2.4 本開発品の強度設計に用いる荷重

加藤等の研究[17]によると、人が手摺に加える力には、転倒・転落時に急激に加えられる強い力と、日常の生活動作・行為を補助するために繰り返し加えられる力の2種類がある。手摺は、転倒・転落時に対しては、最低限手摺が耐“最大荷重”強度を保有していることが必要であり、日常の生活動作・行為に対しては、ガタツキなどのない耐“繰り返し荷重”強度が必要とされている。本開発品の手摺設計では、設計荷重は、加藤等の“最大荷重”を採用し、5.3節“引き戸木材部の強度解析”および5.4節“引き戸の耐久性に関する実験的検討”に用いる。以下に、加藤等の研究から、本開発で採用した最大荷重の選定経緯を説明する。

2.4.1 人の転倒時荷重の計測装置および計測条件

図 2-10 に加藤等の人の転倒時荷重の計測装置[17]を示す。被験者が直径 34mm の手摺を握り、転倒台の上に立つ。手摺は、転倒時の荷重計測器が備え付けられている。転倒台は、移動方向の一端に引張バネが備え付けられ、反対側をロック付きのウインチで引張り、ロックしている。ウインチのロックを外すと、台車は急激に平均加速度 2.3G で 700mm 移動する。被験者は、手摺を掴んだ状態で、台車上で転倒する。その時の手摺に掛かる荷重を測定する。図 2-11 に示すように、転倒実験は、台車の移動方向に対し、(a)前方転倒、(b)後方転倒の二通りで行っている。手摺の高さは、750mm と 800mm の 2 通りを示す。また、被験者は、男子大学生 30 名である。図 2-12 に被験者の身長分布[17]を示す。また、図 2-13 に被験者の体重の分布[17]を示す。被験者の平均身長 170.6cm は、70 歳～74 歳の男性の平均身長 164.5cm より高く、被験者の平均体重 65.7kg は、70 歳～74 歳の男性の平均体重 63.7kg より重い。従ってこの試験から得られる人の転倒荷重を設計荷重に反映させる際に、安全側に働くと考える。

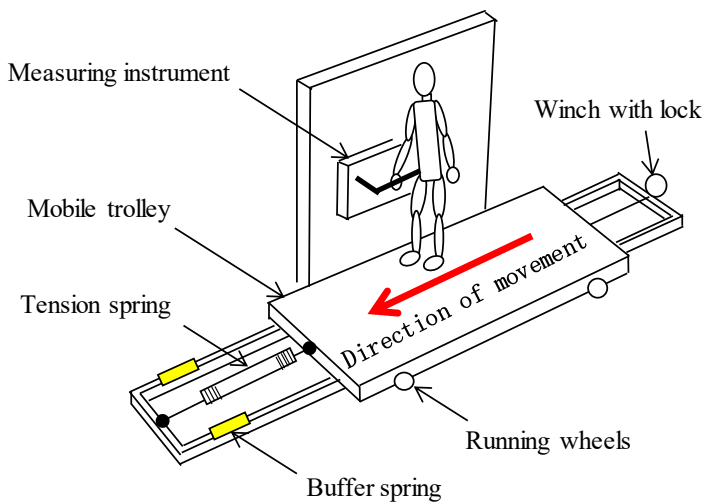
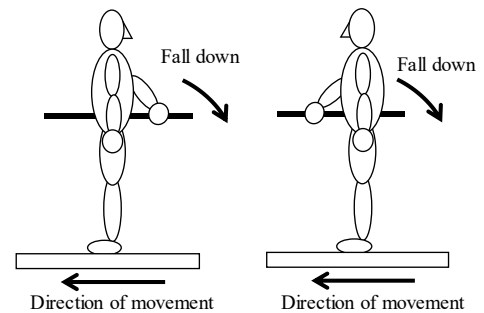


Fig. 2-10 Load measuring device when a person falls



(a) Fall forward (b) Fall backwards

Fig. 2-11 The direction of movement of the dolly and the direction of the person's fall

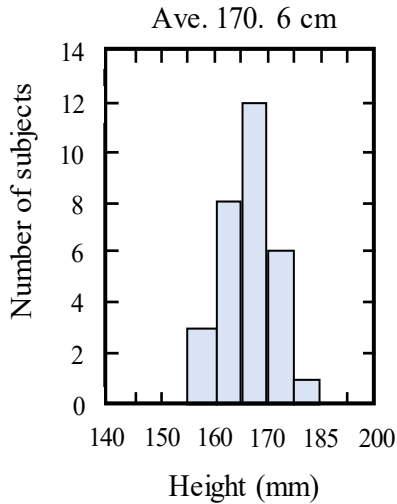


Fig. 2-12 Subject height distribution

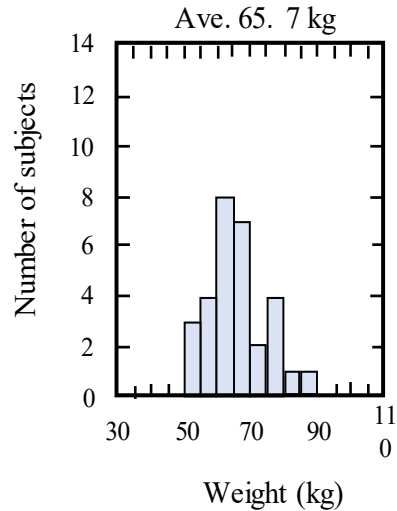
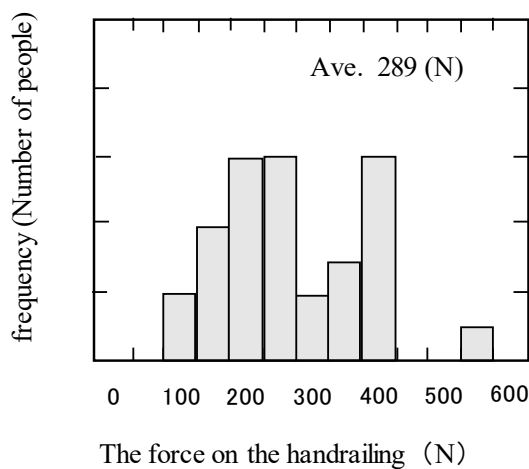


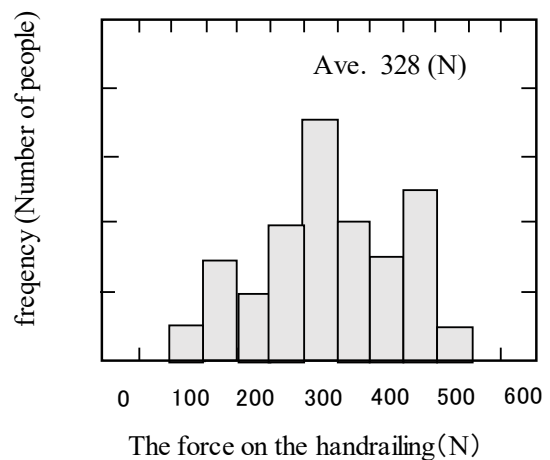
Fig. 2-13 Subject weight distribution

2.4.2 人の転倒時荷重

図 2-14(a)に手摺高さ 750mm の時の前方転倒時荷重の測定値[17]を示し、図 2-14(b)に後方転倒時の荷重の測定値[17]を示す。また、図 2-15(a)に手摺高さ 800mm の時の前方転倒時荷重の測定値[17]を示し、図 2-15(b)に後方転倒時の荷重の測定値[17]を示す。手摺高さ 750mm と 800mm では、手摺高さが低い方が、転倒時荷重が大きい。また、手摺高さ 750mm と 800mm の両方で、前方転倒より後方転倒が、転倒時荷重が大きいことが分かる。これらの最大値は、一部で 500N を超えるものが数例あるが、大半は 400N 以下である。これにより、本開発品の設計荷重を 500N とする。

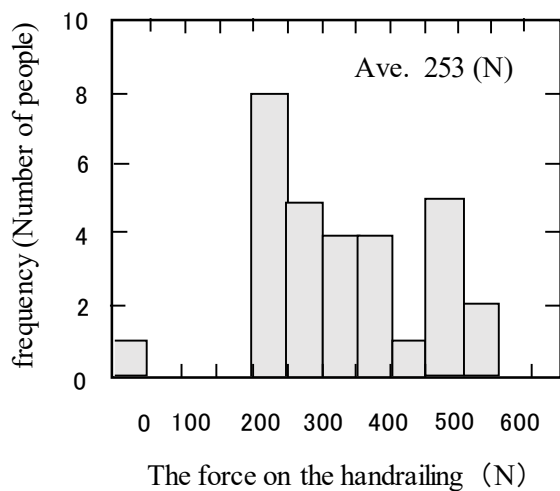


(a) The force applied to the handrail when falling forward

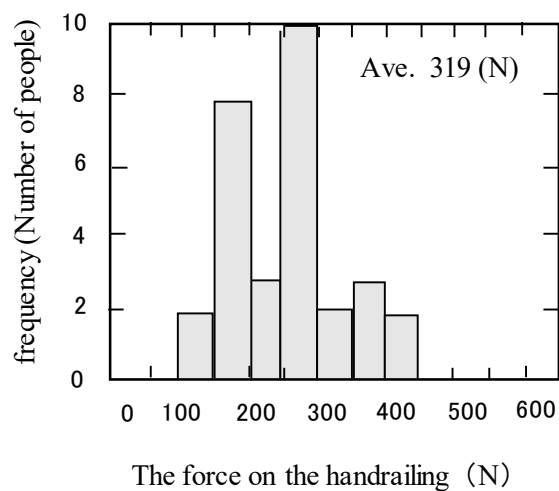


(b) The force applied to the handrail when it falls backward

Fig. 2-14 Human force applied to handrails during accidental tumbling (Handrail height 750 mm)



(a) The force applied to the handrail when falling forward



(b) The force applied to the handrail when it falls backward

Fig. 2-15 Human force applied to handrails during accidental tumbling (Handrail height 800 mm)

2.5 本開発品の設計仕様

図 2-16 に、以上の結果から設計した試作機の形状を示す。また、表 4 に人間工学に基づく設計条件と、それに対する試作機の仕様を示す。手摺棒は、4.1 項より、 $R_G = 1000 \text{ mm}$ の Carved handrail である。主要寸法は、式(1)~(6)に示す設計条件を満たしている。その中で、手摺棒の直径 d は市販鋼製パイプの規格寸法から $d = 31.5 \text{ mm} \approx 32 \text{ mm}$ とした。表 2-4 に示す曲線手摺の曲率半径 R_G と持ち手と手摺の隙間 Δ_{GAP} は、引き戸開口力を検討する際に大きなウェイトを占める回転支点 A とガイドローラー B の位置関係によって決まるため、第 3 章で開口力と合わせて詳しく説明する。

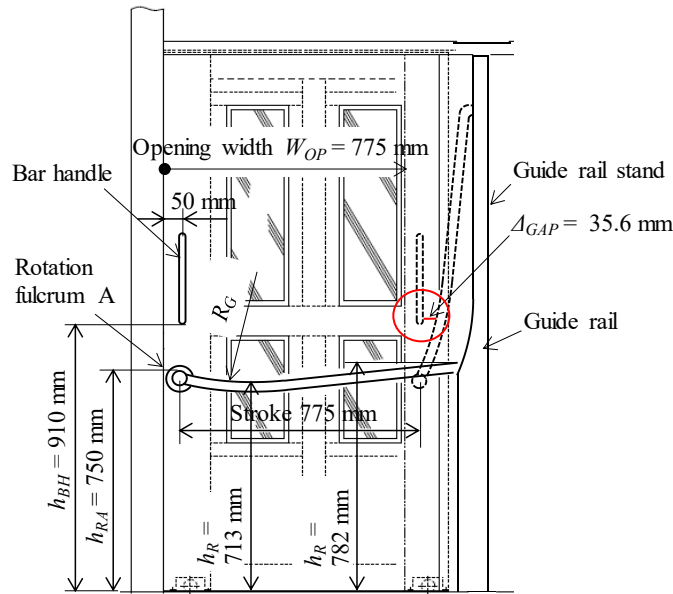


Fig. 2-16 Major dimensions of sliding door equipment

Table 2-4 Major design specifications of prototype

Item	Design condition based on ergonomics		Prototype specifications
Handrail height h_R	$710 \text{ mm} \leq h_R \leq 800 \text{ mm}$	Equation (1)	713–782 mm
Handrail diameter d	$\phi 32 \text{ mm} \leq d \leq \phi 35 \text{ mm}$	Equation (2)	$\phi 31.5 \approx \phi 32 \text{ mm}$
Handrail Bar handle height h_{BH}	$850 \text{ mm} < h_{BH} < 950 \text{ mm}$	Equation (5)	910 mm
Curved rail curvature radius R_G	$600 \text{ mm} \leq R_G \leq 1050 \text{ mm}$	Equation (7) ^{※1}	1000 mm
Gap between handle and handrail Δ_{GAP}	$\Delta_{GAP} \geq 33 \text{ mm}$	Equation (8) ^{※1}	35.6 mm
Opening force Initial opening force $F_{Ax}(x_A \leq 10 \text{ mm})$	$F_{Ax}(x_A \leq 10 \text{ mm}) = 5\text{--}10 \text{ N}$	Equation (3)	5.5 N (Actual) ^{※2}
Opening force Maximum opening force F_{Axmax}	$F_{Axmax} \leq 20 \text{ N}$	Equation (4)	22.4 N (Actual) ^{※2} ($R_3 = 478 \text{ mm}$)
Others Sliding door opening width W_{op}	$W_{op} \geq 750 \text{ mm}$	Equation (6)	775 mm

※1：曲線手摺の曲率半径 R_G および持ち手と手摺の隙間 Δ_{GAP} は、3.6.3 に示す。

※2：3.5.2 節，図 3-14(a) に示す。

2.6 モニタリングによる本開発品の評価

本章で決定した設計条件で製作した本開発品の試作機を使って 2 名の方のモニタリングを行い、本開発品が高齢者および障がい者にとって使いやすいものなのか、歩行機能維持・回復に有用であるのかを調査した。

2.6.1 高齢者（女性）のモニタリング

モニタリングに参加された女性は、年齢 82 歳、身長 152 cm である。本開発品の手摺設置前と設置 3 ヶ月後の本人の歩行状況を調査した。図 2-17(a)は、自分の部屋から出て廊下の手摺を伝い、引き戸の前に来たところである。引き戸に手摺がないため、ここから先は、図 2-17(b)に示すように、家族に介助歩行をしてもらっていた。図 2-18 は、本開発品の手摺を設置した後の歩行状況である。図 2-18 は、今まで歩けなかった引き戸の前を自立歩行しているところである。手摺が連続して取り付けられ、自由に歩行することができるようになっている。表 2-5 に本開発品の手摺の調査項目と、取付前と取付後の状況および手摺設置の効果を示す。①歩行状況、②歩行意欲、③廊下の歩行、④トイレおよび⑤浴室への歩行、⑥階段昇降、⑦家族の介護負担の、および⑧引き戸の開閉操作の感想の 8 項目について調査した。

本開発品の設置前は、歩行状況も不安定で歩行意欲も少なく歩行に対して消極的であったが、手摺設置後は、歩行が安定し、自立歩行できるようになっている。さらに、自立歩行ができるようになったことで、歩行時に毎回行っていた家族の介護負担が解消された。モニタリング後の聞き取り調査で、これまで一人で歩けなかった理由は、転倒して骨折することが怖かったためであることが判明した。本開発品が設置されてからは、手摺に掴まり安心して一人歩きできるようになり歩行機能が向上した。本開発品設置による明確な効果としては、以前は全くできなかった階段の昇降ができるようになったことが挙げられる。



(a) Sliding door without handrail



(b) Care-assisted walking

Fig. 2-17 Care-assisted walking before handrail installation

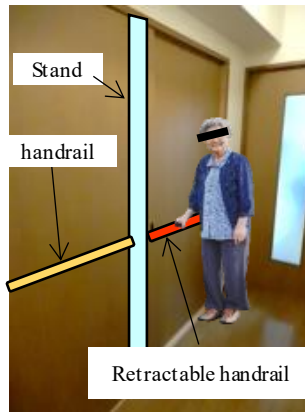


Fig. 2-18 Walking without care assistance after handrail installation

Table 2-5 Changes in walking conditions before/after installation of retractable handrail

No.	Survey item	Before installation	3 months after installation	Effectiveness
1	Walking condition	Walking only when required Unsteady gait	Walking freely Steady gait	Effective
2	Motivation to walk	Low	Increased motivation Increased enjoyment of walking	Effective
3	Walking in corridor	Walking with assistance	Walking by herself	Effective
4	Going to toilet	Walking with care assistance / Attendant required	Walking by herself	Effective
5	Going to bathroom	Walking with care assistance / Attendant required	Walking by herself	Effective
6	Going up/down stairs	Difficult/Incapable	Easier/Capable	Effective
7	Family care	Required whenever she walked	Not required	Effective
8	Opening/Closing operation	N/A	Not strenuous / Easy to use	N/A

2.6.2 足に障がいを持つ男性のモニタリング

左足大腿骨以下に義足を装着した男性の本開発品を展示するショールームでのモニタリング例である。この男性は、年齢 64 歳、身長 165cm で、通常の歩行はロフストランド杖を使用している。ロフストランド杖は、体重の 2/3 を支えることができるが、使用者にバランス能力[14, 15]が求められる。この方の、本開発品の収納式手摺使用後のコメントは次の 3 点である。

1) 手摺の途切れた引き戸のところを杖なしで歩くことができなかった。転倒して骨折することへの恐怖がある。引き戸に手摺があると、手摺が途切れることなく手摺が連続してあるので、安心して自由に歩き回ることができる。

2) 本開発品の開口は、軽すぎず、重すぎずちょうど良い力加減でスムーズに操作できる。

3) 手摺は、杖とは比較できないほど、歩行補助に有効である。手摺は、障がい者にとって単なる移動補助具ではなく、自立生活を営むための大切なものである。この手摺は、自立生活に大変役立つ。

2.6.3 モニタリングによる本開発品の評価

高齢女性と義足を有する男性の本開発品試用の結果、高齢女性は自立歩行ができるようになり、歩行意欲が増し、階段の昇降ができるようになり、大幅な歩行機能の回復が認められた。また、義足を有する男性からは、本開発品が障害者にとって使いやすいものであり、歩行支援に高い有用性があることが確認できた。以上、それぞれの使用者から高い評価が得られた。これにより、本開発品が、高齢者および障がい者の歩行支援および歩行機能回復に有効であることを実証した。

2.7 結 言

本研究では、人間工学に沿った高齢者に適した使いやすさを調査して、本開発品の設計仕様を著し、その本開発品のモニタリングテストで、高齢者および障がい者の歩行機能の回復に有用であるかを検証した。これらにより得られた結論は以下の通りである。

(1) 本開発品を設計するにあたり、建築基準法および文献調査により、①手摺の設置高さ、車椅子が通行できる②引き戸開口寸法と③手摺の納まり寸法および④手摺棒の直径寸法について、文献調査により、高齢者に使いやすいとされるそれぞれの目標値を示した。その目標値の中から、本開発品に適した寸法を設計条件に設定した。ここで設定した寸法形状は、人間工学的に高齢者が使いやすい設計条件となっているので、本開発品以外の手摺の設計寸法にも用いることができる。

(2) 文献調査から、手摺使用する際に、手摺の受ける最大荷重が使用者の転倒時に手摺を掴み転倒する際に掛かる転倒荷重であり、その最大値が 500 Nであることを示した。この荷重を、木製引き戸

に取付ける本開発品手摺の回転支点部の手摺荷重とし、本開発品の最弱部である、引き戸木材の強度設計荷重とした。この荷重は、本開発品以外の手摺取付部分の強度設計にも用いることができる。

(3) 文献調査から、高齢者が最も開けやすい引き戸の持ち手形状と、高齢者が発揮できる引き戸開口力を示した。そこから、高齢者に適した引き戸の初動開口力が5~10Nであることと、最大開口力が20N以下であることを導き出して、本開発品の引き戸開口力の設計条件値を設定した。この引き戸開口力は、人間工学的に高齢者が使いやすい設計条件となっているので、本開発品以外の引き戸の開口力の目標値として用いることができる。

(4) 本開発品を使って、高齢女性と障害を持つ男性のモニタリングを行った。その結果、高齢女性は自立歩行ができるようになり、歩行意欲が増し、歩行機能の回復が認められた。さらに、階段の昇降ができるまでに歩行機能が向上した。また、障がいを持つ男性からは、本開発品が障害者にとって使いやすいものであることと、歩行補助具として有用性が高いことを確認できた。この2件から、本製品が高齢者および障がい者に安心して歩く環境を与え、それにより歩行意欲が増し、歩行機能の回復に寄与することを立証できた。

第2章参考文献

1. 秋山弘子：長寿時代の科学と社会の構想，科学，岩波書店，Vol. 80, No.1 (2010, 1) pp. 59-64
平成18年度厚生労働省老人保健健康増進等事業報告書．地域在宅高齢者に対する歩行支援プログラムの健康増進効果に関する研究, 29.
2. 金憲経，吉田英世，鈴木隆雄，石崎達郎：高齢者の転倒関連恐怖感と身体機能—転倒外来受診者について—，日本老年医学会雑誌,38, 6(2001), 805.
3. WHO Global Report on Falls Prevention in Older Age：WHO Library Cataloguing-in-Publication Data ISBN 978 92 4 156353 6 (NLM classification:WA 288), 20.
4. ケイ・プロダクツ株式会社，引き戸用手摺，引き戸装置，特許出願 2010-102602，公開番号 2011-231513.
5. ケイ・プロダクツ株式会社，引き戸用手摺，引き戸装置，特許出願 2012-133492，公開番号 2013-256808.

6. 長寿社会対応住宅設計指針の補足基準（平成7年6月23日付け建設省住備発第68号 住宅局住宅整備課長通達）指針第2（住宅の設計指針について）1. 通則（3）手摺
7. 2001年度高齢者対応基盤整備計画研究開発 第2編データベース整備(動態・視聴覚特性), 人間生活工学センター, 210-212, 222-229, pp. 32-68
8. 平成30年国民健康・栄養調査報告書, 厚生労働省, <https://www.mhlw.go.jp/content/000681200.pdf>, (参照 2021-8-13)
9. 平成21年国土交通省告示第354号 評価方法基準 [高齢者等配慮対策等級（専用部分）4], 1 専用部分の基準（一戸建て住宅等）
10. 建築基準法令第二十三条第三項（平成29年政令第156号）
11. 八高 隆雄, 山本 圭治郎, 小山 昌洋, 兵頭 和人, 円筒物体把握における握りやすさの感性評価, 日本機械学会論文集 C 編, 1996年 62 巻 602 号 p. 3999-4004
12. Y. Kong, B. Lowe, Optimal cylindrical handle diameter for grip force tasks, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol35, No.6(2005), pp.495-507.
13. 田中眞二, 赤澤堅造, 布田健, 佐藤克志: 高齢者の使用を考慮した引戸の適正な開閉力と操作部形状に関する基礎的検討, 生体医工学シンポジウム(2004), pp. 147-153.
14. E. Grandjean : *Ergonomics of the home*, 16/24, Taylor & Francis, London (1973)
15. 久保晶子, 米田昌文, 添田昌志: 把手形状による手の届きやすさの違いが車いす利用者の引戸を開く動作に与える影響 INFLUENCE OF HANDLE SHAPE OF A SLIDING DOOR ON WHEELCHAIR USERS' DOOR-OPENING BEHAVIOR, 日本建築学会技術報告集 第24巻 第57号, 769-774, 2018年6月 AIJ J. Technol. Des. Vol. 24, No.57, 769-774, Jun., 2018
16. 平成21年国土交通省告示第354号 評価方法基準: 高齢者等配慮対策等級（専用部分）4, 1 専用部分の基準（一戸建て住宅等）
17. 加藤正男, 八藤後猛, 野村歆, 布田健, 直井英男, 動作・行為から見た手すりの分類および手すりにかかる人の転倒時荷重の計測, 日本建築学会計画系論文集, 第584号, 27-33, 2004年10月

第 3 章 開口力メカニズムの解明

3.1 緒 言

介護が必要とされる高齢者、障がい者いわゆる「健康弱者」用の住宅や介護施設、病院等においては、介護者なしでもつかまり歩きができるように、廊下全長にわたり手摺が装着されている。しかし、部屋への出入口に設置される引戸やドアが廊下の途中にある場合、通常の手摺は装着することができず、そのため、手摺がなく歩けない部分が出てしまう。特に、引き戸がある場合、引き戸の合わさる面に手摺を装着すると引き戸の開閉ができなくなるため、通常の手摺は装着することができない。そのため、手摺がなく歩けない部分が出てしまい、トイレや、浴室に一人で行くことに困難が生じる。自立生活をするには、手摺を途切れることなく連続して装着する必要がある。健康弱者の自力歩行が可能な時期に、歩行機能の減退防止の対策がとられた場合、対象者の歩行機能を維持し、回復させることができる[1, 2, 3]。この観点から本研究では、自立歩行を支援する手摺収納式引き戸[4, 5]を開発することを目標とする。

この製品は、歩行機能を維持または回復させて、自活環境を整え、健康寿命の改善に貢献できる装置である。同様の目的でこれ迄に報告されてきた、「跳ね上げ式」[6]は建物構造によっては天井に固定できず、また跳ね上げ動作姿勢が不安定になり転倒の危険性がある等の難点がある(図 3-1(a))。この他に「伸縮式」[7, 8, 9]は手摺自体が伸縮するため耐久性への不安と、引き戸にすべての体重がかかり、脱落や転倒などの危険性が危惧される(図 3-1(b))。引き戸以外では、階段に装着する手摺の形状や設置位置等を提案した研究[10~13]は数多く行われているが、廊下に沿う引き戸に装着できる手摺の開発・研究はあまり行われていない。そこで本研究では、図 3-2 に示す収納式の手摺を有する引き戸を考案し、高齢者・障がい者が安心して使用できる手摺装置を目指して、その設計上の設題に取り組む。具体的には手摺の操作性の点から引き戸開口力を、数値解析と実験を組み合わせ考察する。それにより、前章で人間工学の観点から明らかにした初動開口力、最大開口力を満たす回転支点 A とガイドローラー B の位置関係およびガイドレール形状について検討する。また、検討過程で引き戸開口時に引き戸の持ち手と収納される手摺が干渉する問題が発生した。これを解決する独創的な曲線手摺を考案した経緯を説明する。

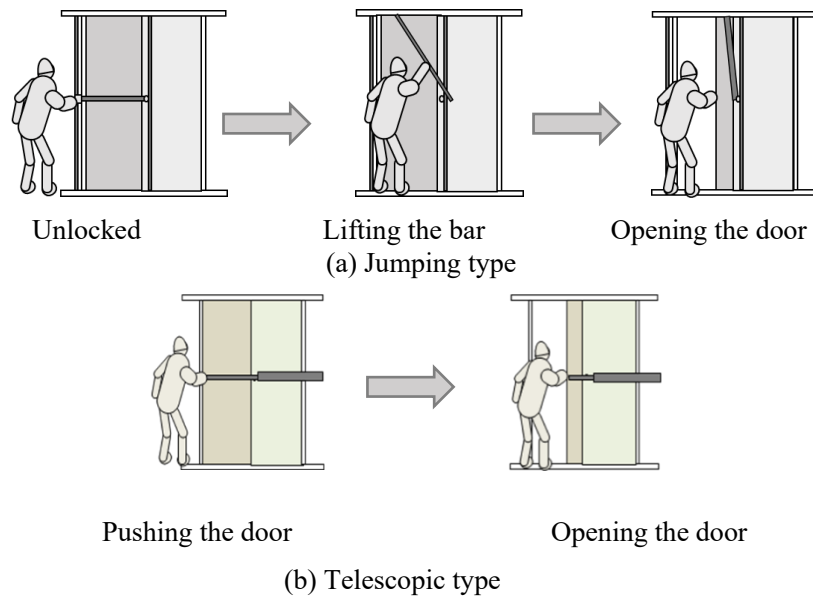


Fig. 3-1 Current types of the sliding door

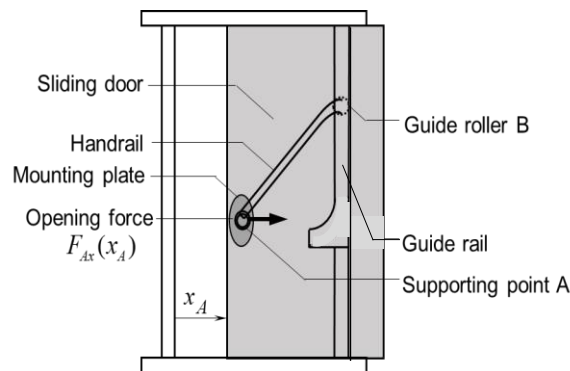


Fig. 3-2 Figure of this matter handrail summary

3.2 従来技術とその問題点

図 3-3～図 3-5 に従来技術による引き戸の例を示す。図 3-3 に示す伸縮式手摺は手摺に体重を掛けると引き戸が敷居から外れ倒れる恐れがある。また、引き戸を開けた後に、閉まる方向の力が全く作用することがないため、開けた状態の引き戸を、閉める動作が必要となる。このため、手摺に沿った一方向の円滑な移動が困難となる。図 3-4 示す、跳ね上げ式手摺は強度的には問題ないものの、手摺の跳ね上げ動作が対象者には困難である。図 3-5 に示すスタンド連結手摺[14] は、簡単に設置できるが、スタンドが構造的に不安定で、固定を垂直方向の突張力に依存するため、経時的に緩みが生じやすく、スタンドが転倒する恐れがある。このように従来技術によるものは、主として健常者の視点で考案されている

ようである。震える手足で立ちながら，倒れないように片手で体重を支え，残りの片手で手摺を操作し，引き戸を開口する動作は使用者には過酷である。また，強度及び安全性に不安が残る。

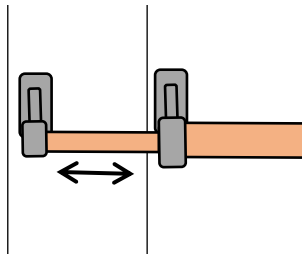


Fig. 3-3 Extendable handrail

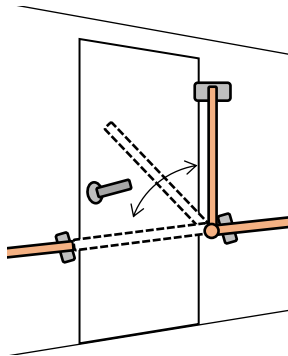


Fig. 3-4 Bascule handrail

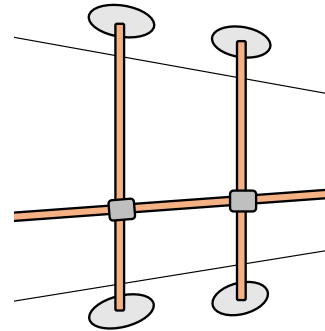


Fig. 3-5 Stand type handrail

3.3 論文に用いる記号と引き戸装置の構造

3.3.1 引き戸装置の構造

本開発品の手摺設計において，第2章2.2節の“人間工学に基づく各部の寸法”および2.3節の“高齢者に適した持ち手形状と引き戸の初動開口力および最大開口力”から設計仕様が決まり，手摺各部の形状や許容される設計スペースが決まってくる。本開発品設計の重要なポイントは，その限られた設計スペースの中で，目標の引き戸開口力を実現する回転支点 A と回転ローラーB の適切な位置と，後述する図3-14(b)に示す回転ローラーB がスムーズに転送できるガイドレールの形状を見つけたことである。

図3-6(a)に本開発品である手摺収納式引き戸装置を示す。本開発品は，引き戸，収納式手摺，回転支点，収納式手摺端部の回転ローラーとその転走面であるガイドレールで構成されている。引き戸を閉じた状態で，収納式手摺が水平状態になり，手摺としての機能を果たす。図3-6(b)に引き戸の閉状態を示す。引き戸を開口する動きで収納式手摺は回転支点 A を軸にして，手摺端部の回転ローラーB がガイドレールスタンド内部の転走面を上方へ移動する。引き戸を閉じる動きで収納式手摺がガイドレール内部の転走面を伝い，下方へ移動する。

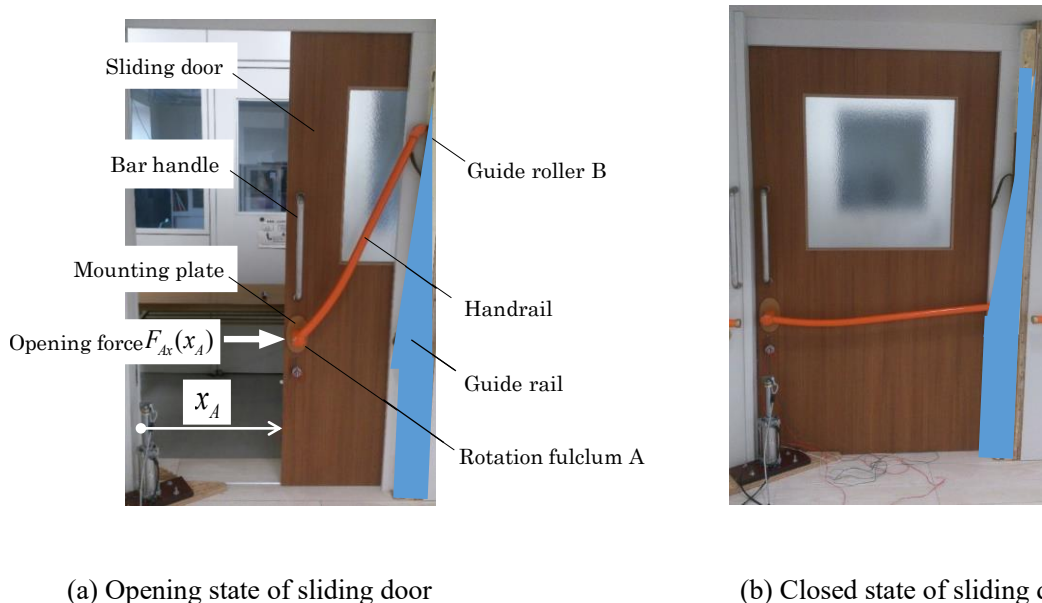


Fig. 3-6 Retractable handrail on sliding door

手摺の上昇をスムーズにできるように，アシスト装置を手摺近傍に設置して，筋力の衰退した高齢者や障がい者でも弱い力(19.6 N以下) [19, 20] で容易に開閉できるように工夫されている．使用面においては，人間工学の観点から，人に優しく，高齢者でも開けられる引き戸操作にすることが重要であり，片手で引き戸を開口するだけの単純な使い方とすることを想定して設計している．そのため車椅子利用者にとっても，手摺を小さい力で押し引きするだけで引き戸を簡単に開閉できる引き戸開口力を目標通りのものにできたならば，利用者にとって安定して使いやすいものになる．

3.3.2 記号および設計緒言

本論文で使用する記号をまとめて以下に示す．

- $F_{Ax}(x_A)$: 引き戸開口力 (目標値 19.6 N)
- $F_{Ay}(x_A)$: 収納式手摺が引き戸本体から受ける力
- (x_B, y_B) : ガイドレール円弧部の中心座標
- x_A : サポートポイント A の x 方向座標 (=引き戸開口距離)
- x_B : ガイドローラー B の中心点の x 方向の座標

- y_B : ガイドローラーBの中心点のy方向の座標
 Q : 走行抵抗
 P : 収納式手摺がガイドレールから受ける力
 R : ガイドレールスタンド内部の転走面曲率半径
 θ : 収納式手摺と水平線のなす角
 ϕ : 点ABをつなぐ直線と、ローラーとガイドレールの接点における接線方向のなす角
 ε : ローラーとガイドレールとの接線と、垂直線のなす角
 W : ガイドローラーを含む手摺棒の重量 (試作品, 鋼鉄製 $W = 13.7 \text{ N}$)
 M : アシストデバイスによるモーメント ($M = k(0.5\pi - \theta)$)
 k : アシストデバイスの定数
 μ_i : ベアリングの摩擦係数[15] 0.03 と回転ローラーの転がり摩擦係数[16]
 (ベアリング軸径とトラクションから求まる) の和 $\mu_i = 0.035$)
 a : AB間y方向距離
 b : AB間x方向距離
 c : ガイドローラー接点からレール垂直点までの距離
 r : ガイドローラーBの半径
 e : ガイドローラーBの中心点から、ローラーとレールの接点までのx方向距離
 l : 収納式手摺棒の長さ
 E : ガイドレールの曲線終端部と接する、垂直線との接点

3.4 引き戸開口力の解析

3.4.1 収納式引き戸の力のつり合いと開口力の導出

図3-7に解析する手摺のモデルを示す。これは、回転支点軸にアシストデバイスを装着しない場合である。また、図3-8に回転支点軸にアシストデバイスを装着した場合の手摺自由体図を示す。図3-8の力のつり合いより(1), (2), (3)が成立する。

$$F_{Ax}(x_A) = Q \cos(\theta + \phi) + P \sin(\theta + \phi) \quad (1)$$

$$F_{Ay}(x_A) + P \cos(\theta + \phi) = W + Q \sin(\theta + \phi) \quad (2)$$

$$M + lP \cos \phi = \frac{1}{2} lW \cos \theta + lQ \sin \phi \quad (3)$$

ここで式(1), (2), (3)より以下の式が導き出される。

$$F_{Ax}(x_A) = \mu_t P \cos(\theta + \phi) + P \sin(\theta + \phi) \quad (4)$$

$$F_{Ay}(x_A) = W + \mu_t P \sin(\theta + \phi) - P \cos(\theta + \phi) \quad (5)$$

ここでは、引き戸全閉状態位置での回転支点Aの中心座標原点 $(x_{A0}, y_{A0}) = (0, 0)$ と、ガイドレール曲率半径Rの座標原点 $(x_{B0}, y_{B0}) = (0, 0)$ を基準座標とする。次に、回転支点Aの任意の移動量 x_A に対するガイドローラーBの中心座標 (x_B, y_B) 、及び曲率半径Rとその中心点O (h, i) から定まる θ 、 ϕ は、次式で求まる(図3-7)。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(y_B - y_{B0}) - a}{\sqrt{l^2 - ((y_B - y_{B0}) - a)^2}} \quad (6)$$

$$\phi = 90^\circ - (\theta + \varepsilon) \quad (7)$$

$$\varepsilon = \sin^{-1} \frac{y_D - (y_B - y_{B0})}{R - r} \quad (8)$$

式(1)~(8)より $F_{Ax}(x_A)$ を求めることができる。

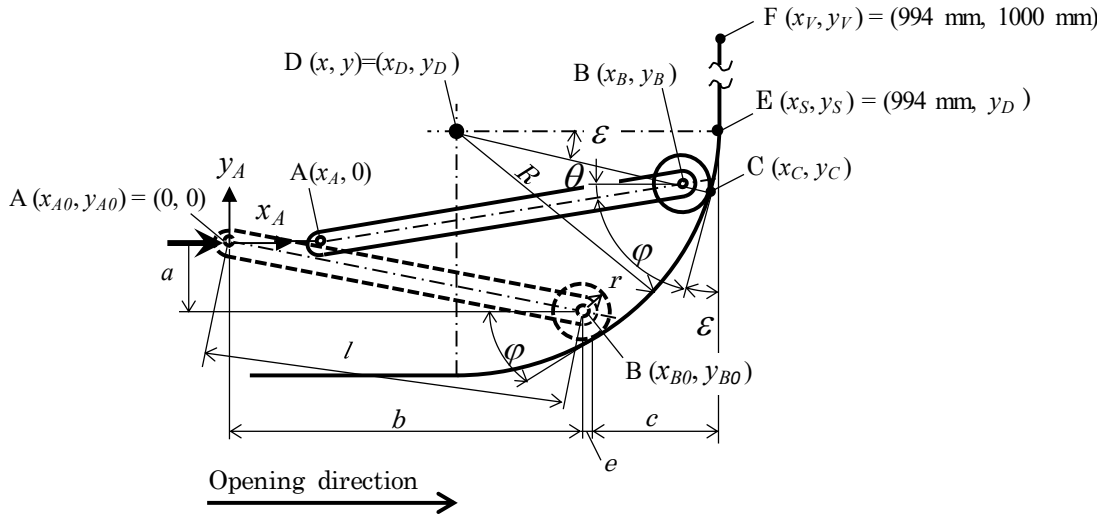


Fig. 3-7 Schematic illustration of retractable handrail and guide rail

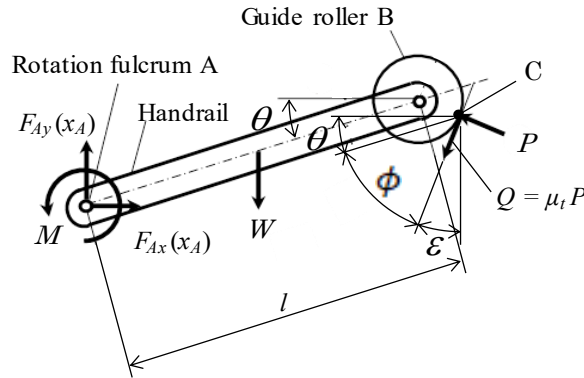


Fig. 3-8 Equilibrium of external forces with torsion spring

この開口力 $F_{Ax}(x_A)$ は、式(1)~(3)の釣り合い式から求めたものであり、引き戸開口距離 x_A における手摺収納式引き戸が開口を始める直前の開口力を示している。なお、開口力 $F_{Ax}(x_A)$ に及ぼす慣性力の影響についても検討したが、無視できる程度であったので解析には含めていない。

3.4.2 ガイドレールの形状と引き戸開口力

この章では、ガイドレールの単純な形状を想定する。次に、開口力について説明する。図 3-9 (a) は、 $R = 200, 300, 400, 500, 600 \text{ mm}$ の場合の式 (4) から得られる開力 $F_{Ax}(x_A)$ のシミュレーション結果である。図 3-9 (b) は、ガイドレールが曲線部分と直部分で構成されるシミュレーションモデルを示している。このモデル化では、ガイドレールの形状 $0 \leq x \leq 10 \text{ mm}$ は後で検討するため、 $x \gg 10 \text{ mm}$ のときに開く力を求める。引き戸が $x = 10 \text{ mm}$ の位置にあるとき、回転ローラー B は、図 3-9 (b) の円弧の端にある点 C に接触し始める。図 3-9 (a) に示すように、開力 $F_{Ax}(x_A)$ は、距離 x_A の増加に伴い徐々に増加

し、 $x_A = 79 \sim 105$ mm 付近で最大値をとり、その後徐々に減少する。図 3-9 (a) では、 R が小さくなると最大開力が大きくなる。

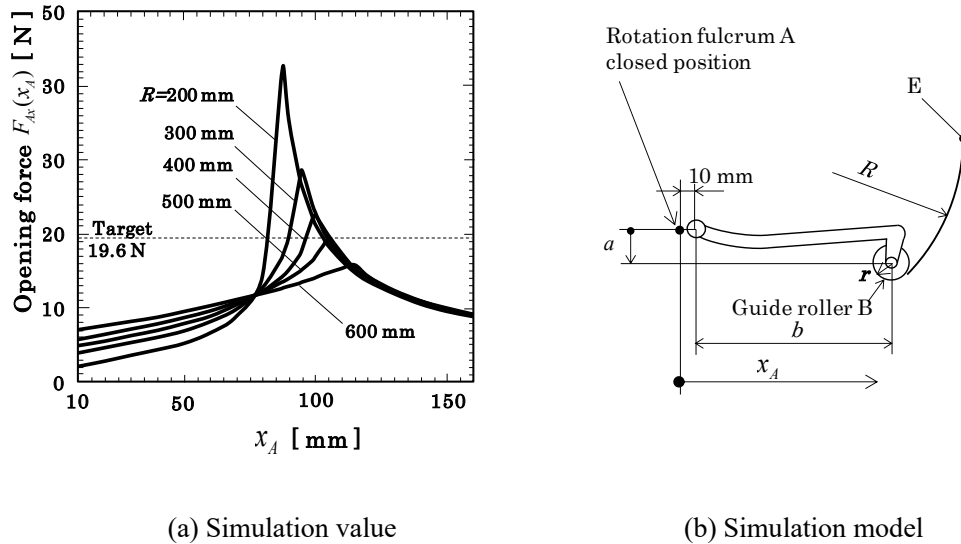


Fig. 3-9 Sliding force $F_{Ax}(x_A)$ in Fig. 3-7 obtained from equation (4) by varying R

3.4.3 引き戸最大開口力挙動の考察

図 3 - 9 (a) に示すように、開口力は $x = 79 \sim 105$ mm 付近の一定の距離で最大値を取る。ここでは、最大開口力を示す距離 x について説明する。まず、図 3-7 の線 AB の手すりバー方向とガイドレールの接線方向の間の角度 ϕ に注目する。図に、角度 ϕ が異なる 3 つのモデルを示す。図 3-10 (a) の角度 $\phi = 90^\circ$ の場合、ガイドレールに垂直に作用する力 F_A は点 B を上方向に上げることができない。一方、図 3-10 (b) に示すように $\phi < 90^\circ$ の場合、ローラーを上げることができる。図 3 - 10 (c) のように角度 ϕ が小さい場合、ローラーはより小さな力で動かすことができる。したがって、角度 ϕ が 90° に近づくと、開口力が大きくなる。

図 3- 11 は、開口力 F_{Ax} と開口距離 x に対する角度 $\phi(x_A)$ を比較したものである。角度 ϕ は、距離 x が増加する間に増加し、図 3-7 の点 E の周りでピーク値を取り、その後減少する。開口力 F_{Ax} についても同様の挙動が見られる。 ϕ のピーク値の位置は、ローラーの直径が結果に影響を与えるため、 F_{Ax} のピーク値の位置とわずかに異なる。凸状に現れる最大開口力 F_{Ax} は、角度 ϕ の変化で説明できる。最大開口

力は、点 B が図 3-7 の直線部分が始まる円弧の終点 E にあるときに現れる。田中らによると 20N 以下の開放力は高齢者に適していると報告されている[19].

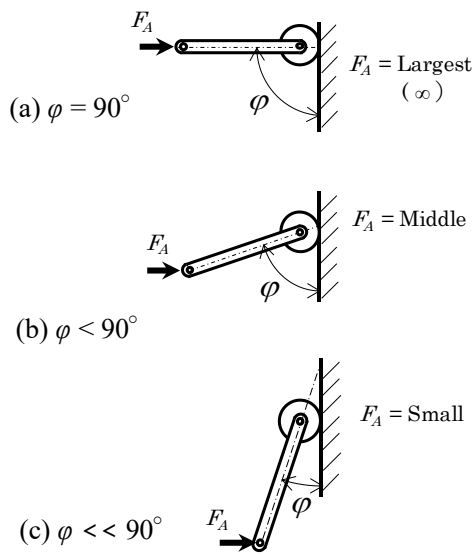


Fig. 3-10 Schematic illustration $F_{Ax}(x_A)$ depending on φ

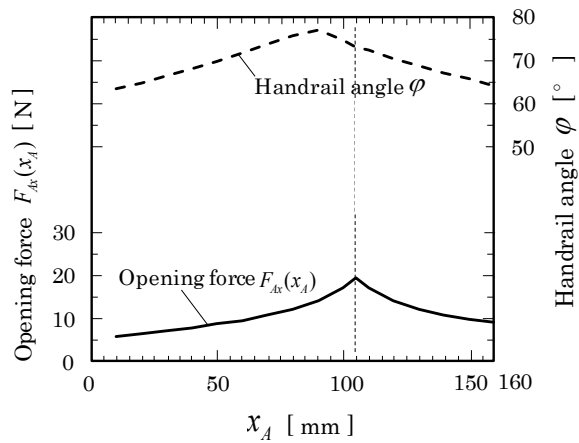


Fig. 3-11 Opening force $F_{Ax}(x_A)$ closely related to angle $\varphi(x_A)$

3.5 試作手品の形状と開口力

2章の図 2-16 に示す本開発品は、引き戸、手摺、回転支点 A、収納式手摺端部のガイドローラー B とその転走面であるガイドレールで構成されている。引き戸を閉じた状態で、収納式手摺が水平状態になり、手摺としての機能を果たす。手摺は、引き戸を開口する動きで回転支点 A を軸にして、手摺端部のガイドローラー B がガイドレールスタンド内部の転走面を上方へ移動し、垂直方向に収納される。また、引き戸を閉じる動きでガイドレール内部の転走面を伝い、手摺は下方へ移動する。引き戸最大開口力の大きさは、回転支点 A とガイドローラー B の高さの差 ΔAB とガイドレールの曲率半径 R によって決まる。従って、本開発品の設計の要点は、前章の人間工学的条件沿った主要寸法を設計に用いることと、最大開口力を満足するための、回転支点 A とガイドローラー B の高さの差とガイドレールの曲率半径 R の大きさ、および初動開口力を満たすためのガイドレール形状を設計することである。設計において、2章の図 2-16 に示す各部の主要寸法は、2章の式(1)~(6)を満足する必要がある。以下に、その設計経緯を示す。

3.5.1 手摺支点の高さの差 Δ_{AB} と最大開口力 F_{Axmax} の関係

本開発品の開口力は、回転支点 A とガイドローラー B の高さの差による影響を大きく受けることが予備の検討で分かっている。ここで、図 3-12(a),(b),(c)に回転支点 A と回転ローラー B の高さの差が異なる 3 つのモデルを示す。図 12(a)は、 $\Delta_{AB} = -25$ mm, 図 3-12(b)は、 $\Delta_{AB} = 0$ mm, 図 3-12(c)は、 $\Delta_{AB} = 25$ mm 場合であり、これらの 3 つの場合の開口力や、手摺と持ち手干渉を調べる。図 3-13(a), (b), (c)は、3.4.1 項の釣り合い式で求めた 3 つのモデルの開口力の結果である。ガイドレールの曲率半径は、 $R = 200, 300, 500$ mm の 3 種類とした。 $\Delta_{AB} = -25$ mm である図 3-13(a)の最大開口力は、19.5N で設計条件の 20N を満足している。また、 $\Delta_{AB} = 0$ である図 3-13(b)の最大開口力は、19.3N であり、 $\Delta_{AB} = -25$ mm と $\Delta_{AB} = 0$ の場合の最大開口力の差は小さい。 $\Delta_{AB} = 25$ mm である図 3-12(c)の最大開口力は、16.8N で 3 つのモデルの中で、最も最大開口力が小さい。この結果、回転支点 A よりもガイドローラー B が上にある場合の方が、

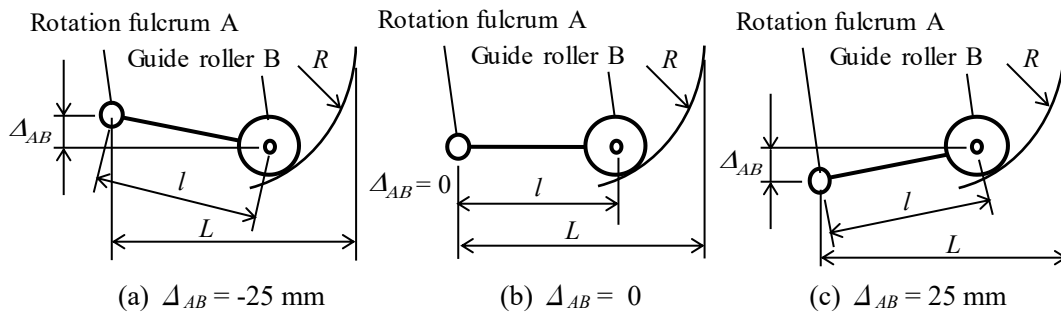


Fig. 3-12 Positional relation of rotary fulcrum A and guide roller B

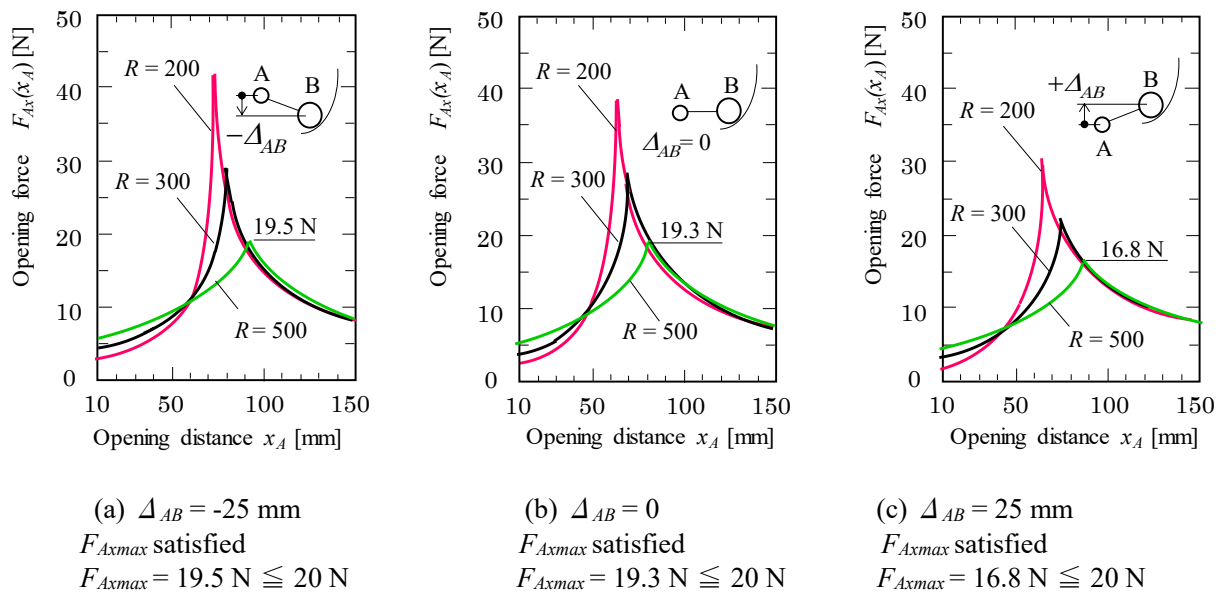


Fig. 3-13 Maximum opening force condition can be satisfied when $\Delta_{AB} \geq -25$ mm

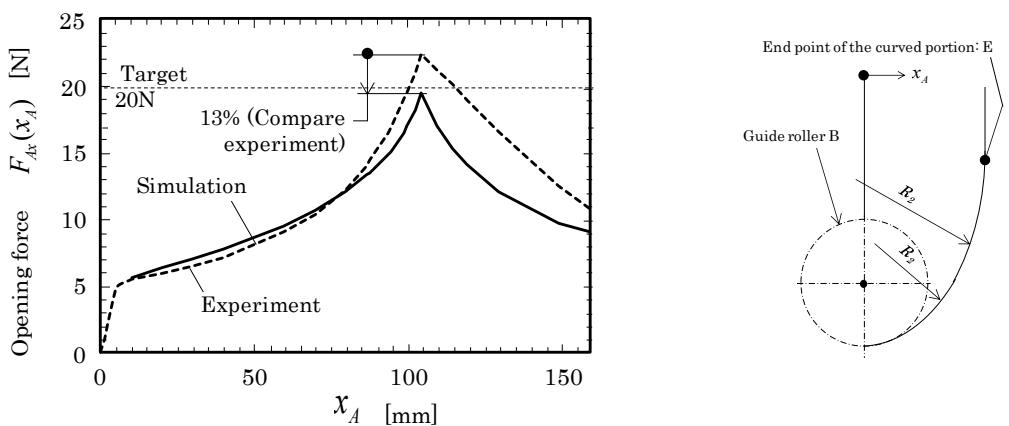
下にある場合に比べて最大開口力が小さくなることが分かる。最大開口力を小さくするには、図 3-13(c) の $\Delta_{AB} = 25\text{mm}$ が優位である。

3.5.2 ガイドレール形状の決定—安全のために初動開口力 F_{Ax} ($x_A \leq 10\text{mm}$) を大きくする

ここでは、引き戸初動開口力とレール形状の関係について説明する。前章 2.3.2 項で、田中らと E. Grandjean の研究を元に、引き戸の開け初めに生じる初動開口力 $5\text{N} \leq F_{Ax}(x_A \leq 10\text{mm}) \leq 10\text{N}$ とすることを説明した。これは、初動開口力が軽いと、引き戸が先走り、急に開いてしまい、引き戸の持ち手を握りしめた使用者が体のバランスを崩して転倒する危険があるからである。

手すりのスムーズな動きは、ガイドレールに完全に依存する。図 3-14(b)は、数回の試行後に決定されたプロトタイプガイドレールの幾何学的形状を示している。動きはじめから最大開口力が生じる部分までのガイドレールは、2つの曲線 R_1 , R_2 で構成されている。

ここで、 R_2 は高齢者が使用できる引き戸の最大開口力 $F_{Axmax} \leq 20\text{N}$ を満足する曲率半径にしている。即ち、 R_2 をある程度小さくすると、 $F_{Axmax} \leq 20\text{N}$ を満足しない。また、 R_1 との滑らかな接続ができる R_2 を選定しなければならない。また、手摺収納式引き戸をドアとして安全に使用するには、初期開口力 $F_{Ax}(x_A \leq 10\text{mm}) \geq 5\text{N}$ とする必要があるので、この条件を満足できる R_1 を選定しなければならない。



(a) Prototype opening force

(b) Guide rail shape

Fig. 3-14 Prototype opening force and guide rail shape

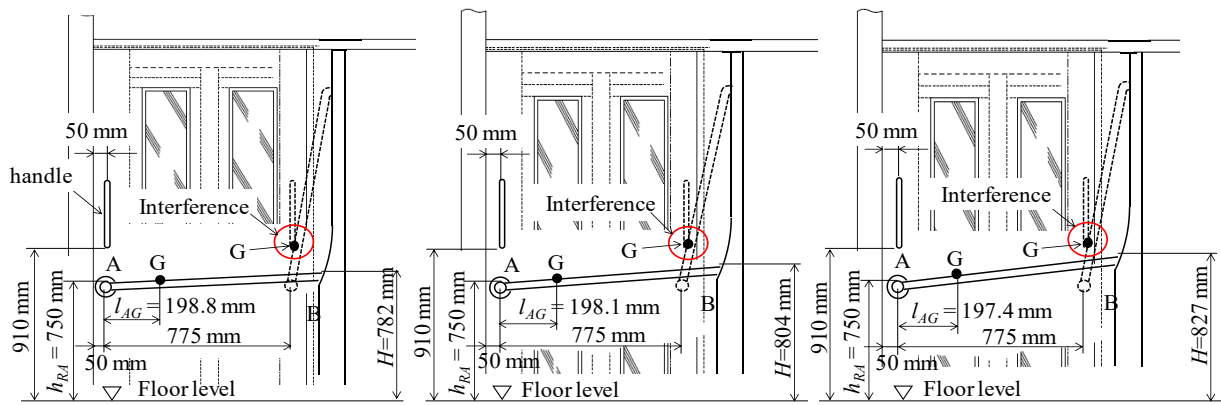
ここで、図 3-14(a)は、最大開口力の解析値と実験値である。解析値 $F_{Axmax} = 19.5\text{N}$ 、実験値 $F_{Axmax}^{Exp} = 22.4\text{N}$ であり、解析値の実験値に対する差は 13%であった。この実験値と解析値の間に生じる差は、主にガイドレールの製作および組立誤差に由来するものと考えている。

3.6 手摺高さを持ち手高さの人間工学的条件を満足し、持ち手の挟み込みを防ぐ曲線手摺の提案

3.6.1 真っ直ぐな手摺棒の手摺高さとし、持ち手との干渉

図 3-12(a), (b), (c)は、手摺の点 AB 間を直線として示しているが点 B ではその理由を 3.6.2 項に示す。図 3-15(a), (b), (c)は、このような傾斜を有する直線棒と持ち手を 3 つのモデルで示したものである。左側にある、回転支点 A の手摺上面の高さを、750 mm としている。この場合、手摺棒の高さ h_R においては、図 13(a)は 2 章の設計条件式(1)の手摺棒の高さ $710\text{ mm} \leq h_R \leq 800\text{ mm}$ を満足する。しかし、図 3-15(b), (c)は、開口力は小さいが、手摺棒の高さ $710\text{ mm} \leq h_R \leq 800\text{ mm}$ を満足できていない。

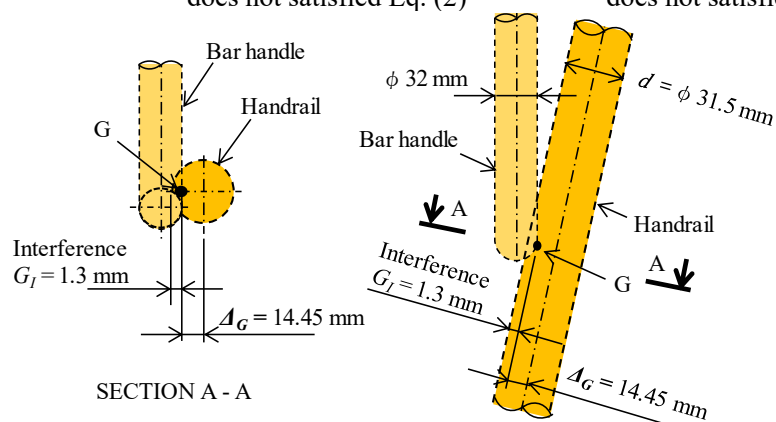
さらに、図 3-15(a), (b), (c)の全てにおいて、引き戸を全開した手摺収納位置で、手摺と持ち手が干渉する重大な問題がある。図 3-15(a), (b), (c)に、手摺と持ち手の干渉箇所を点 G で示す。図 3-15(a), (b), (c)の 3 つの図では、引き戸に取付けた持ち手の位置、回転支点 A の位置、ガイドスタンドの位置と引き戸開ロストロックおよび手摺形状が同じなので、回転支点 A とガイドローラー B を結んだ時の高さ H と h_{RA} の差によらず、点 G の位置は同じである。図 3-15(d)に、干渉箇所の拡大図を示す。持ち手は、市販品の中でも一般的な、円筒形状の直径 $d_B = 32\text{ mm}$ とした。持ち手と手摺は 1.3 mm (G_I)干渉し、持ち手側の外周端の位置を点 G と、手摺中心までの距離 $\Delta_G = 14.45\text{ mm}$ である。図 3-15(a), (b), (c)において、点 G を引き戸全閉時の水平状態の手摺棒に表すと、点 G は回転支点 A から l_{AG} の水平距離にある。図 3-15(a), (b), (c)に示す l_{AG} のそれぞれの値が異なっているのは、高さ H と h_{RA} の差により手摺棒の勾配に差があるためである。



(a) $H = 782 \text{ mm}$
with $h_{RA} = 750 \text{ mm}$
satisfy Eq. (2)

(b) $H = 804 \text{ mm}$
with $h_{RA} = 750 \text{ mm}$
does not satisfied Eq. (2)

(c) $H = 827 \text{ mm}$
with $h_{RA} = 750 \text{ mm}$
does not satisfied Eq. (2)



(d) Magnified view of interference between handle and handrail

Fig. 3-15 Interference cannot be prevented by change Δ_G

3.6.2 持ち手の挟み込みを防ぐ曲線手摺の提案

次に、図 3-16 は、持ち手と手摺の干渉をかわすために考案した曲線手摺の幾何学的形状を示す。曲線手摺の形状を決める上で最も重要なことは、干渉しないことである。ここでは、ガイドローラーB が回転支点 A の上方に位置する図 3-2(a)の場合で説明する。

1)まず、点 A と点 C を結ぶ真っ直ぐな手摺棒の中心線から上の $l_G = 14.5 \text{ mm}$ と、点 A から水平方向に $l_{AG} = 198.8 \text{ mm}$ の交点として点 G を描く。

2)この点 G から下方へ $h_G = 60 \text{ mm}$ の位置を点 G' とし、点 A と点 C をそれぞれ直線でつなぐ。点 G' は、曲線手摺作図上の基点であり、 $h_G = 60 \text{ mm}$ は、手摺棒と持ち手の干渉量 $G_I = 1.3 \text{ mm}$ と、後述する式(9)に示す手を挟まれない寸法 $\Delta_{GAP} \geq 33 \text{ mm}$ を考慮して決定したものである。 $h_G \geq 60 \text{ mm}$ 以上にすれば、接触

次に、図 3-17 における、曲線手摺の手摺高さ h_R を検証する。図 3-17(a)は、2 章の式(2)の手摺高 $710 \text{ mm} \leq h_R \leq 800 \text{ mm}$ の設計条件を満足している。図 3-17 (b), (c)は、引き戸開口力 F_{Amax} は小さいが、手摺高さ h_R の設計条件を満足できていない。従って、最大開口力 F_{Axmax} と持ち手と手摺の隙間 Δ_{GAP} および手摺高さ h_R の条件を満足できる形状は、図 3-17(a)である。

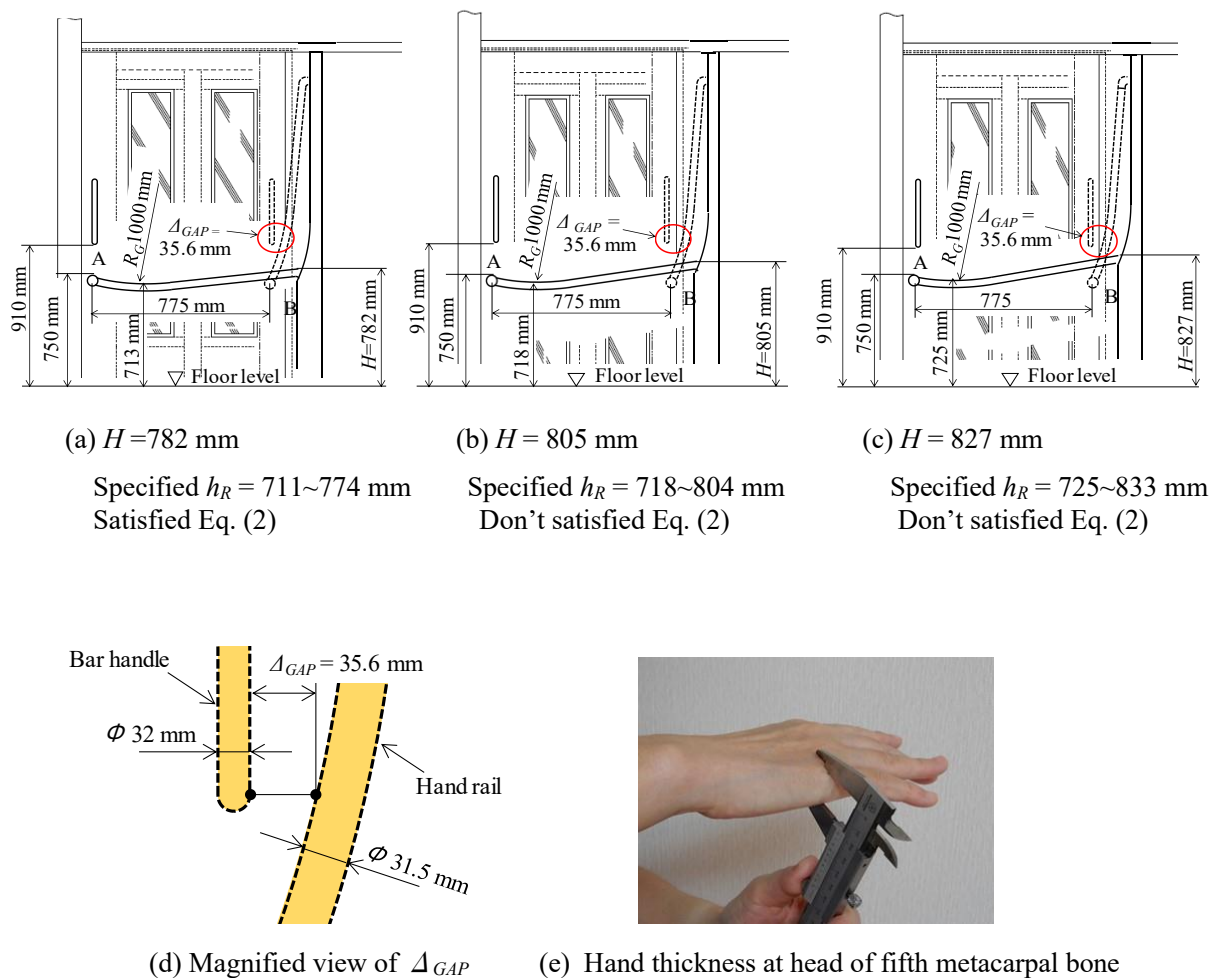
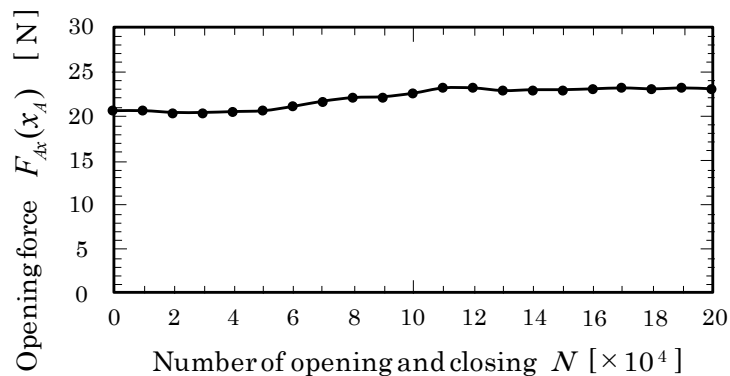


Fig. 3 – 17 Interference can be prevented by change Δ_{GAP}

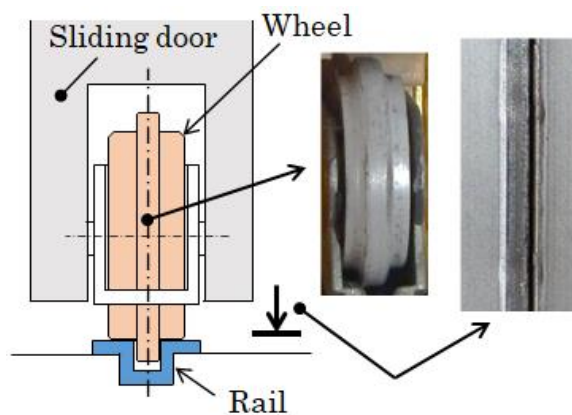
3.6.3 手摺収納式引き戸の繰り返し開閉試験

ここでは、手摺収納式引き戸の繰り返し開閉試験を行い、引き戸開口力の変化を調べた。開口力 $F_{Ax}(x_A)$ の測定に使用した試作品 1 号機と同等の試作品 2 号機をこの試験に使用した。試作機に用いた車輪とレールは市販品である。今回の実験では、20 万回に達するまで手でドアの開閉を行い、試験は次の手順で繰り返し行った。手摺の取っ手を持って、手摺が完全に収納される位置まで引き戸を開き、次

に引き戸を完全に閉める．平均速度は、775 mm の開口ストロークで 12.5 サイクル/分である．1 万回毎に、バネ計りで開放力を測定し、引き戸を開口する過程の最大値を目視で読み取った図 3-18(a) は、繰り返し開閉試験における開力測定値のプロットである．開口力 $F_{Ax}(x_A)$ は、試験開始時の 20.5 N から徐々に増加し、11 万回で最大値 23.1N となり、20 万回まではほぼ一定となった．この時の開口力の増加量は約 10%であり、これは、開閉の繰り返しにより、扉を支える樹脂製の車輪やレール表面に摩耗が生じ、その摩耗により走行抵抗が増加するものと考えられる．図 3-18 (b)に 20 万回使用後の車輪とレールを示す．使用開始当初は新品であったが、試験後の車輪とレール面に摩耗痕が見られる．車輪とレールの摩耗寿命に関しては、繰り返し開閉試験は、1日あたり 5000 往復回の試験を 40 日間繰り返しておこなったものであるが、一般的な使用では、1日あたり 20 往復回程度の使用回数である．従って、通常の使用では、車輪とレールの摩耗寿命が問題となることはないものと考えられる．



(a) Opening force vs. number of cycles



(b) Rail and wheel wear

Fig. 3-18 Repeated opening/closing test for sliding door

3.7 引き戸最大開口力の低減化とその考察

引き戸の最大開口力を低減する方法には、①3.4.2 項の図 3-9(a)に示すガイドレールの曲率半径 R を大きくすること、②3.5.1 項の図 3-12 に示す回転支点 A とガイドローラー B の高さ Δ_{AB} を大きくする方法が上げられる。以下に、それぞれの低減方法を説明する。

3.7.1 曲率半径 R_3 による最大開口力 F_{Axmax} の低減

3.4.2 項の図 3-9(a)に示す引き戸開口力 $F_{Ax}(x_A)$ の解析値では、ガイドレールの曲率半径 R_3 が大きいと最大開口力 F_{Axmax} が減少しており、ガイドレール曲率半径 R_3 を大きくすることが最大開口力の低減に有効であることが分かる。しかし、3.5.2 節で述べたように、初動開口力 $5N \leq F_{Ax}(x_A \leq 10mm) \leq 10N$ を満たすように、動きはじめから最大開口力 F_{Axmax} が生じる部分までのガイドレールは、2 つの曲線 R_1 , R_2 を調整して連結しなければならない。従って、ガイドレールの曲率半径 R_3 を大きくして最大開口力 F_{Axmax} を低減できる余地は、微調整の範囲しか残されていない。

3.7.2 回転支点 A に対するガイドローラー B の高さの差 Δ_{AB} による最大開口力 F_{Axmax} の低減

3.5.1 項で、回転支点 A とガイドローラー B の高さ $\Delta_{AB} = 25 \text{ mm}$ をとすると最大開口力 F_{Axmax} の低減に優位であると説明した。しかし、図 3-13(c)の $\Delta_{AB} = 25 \text{ mm}$ 、また、図 3-13(b) $\Delta_{AB} = 0 \text{ mm}$ の場合でも手摺高さの 2 章の設計条件式(1)を満たすことができない。ここで、図 3-13(a)の $\Delta_{AB} = -25 \text{ mm}$ と図 3-13(b)の $\Delta_{AB} = 0$ のガイドレールの曲率半径 $R = 500 \text{ mm}$ の最大開口を比較してみると、19.5N と 19.3N で、その差は 0.2N である。従って、 Δ_{AB} を微調整する余地は残されていない。

3.8 結 言

本研究では、手摺を有する引き戸において、開ける力をシミュレーションする理論式を求め、それを用いて引き戸を開く力の解析と実験を行い本開発品の開口力がピーク値を取る特徴があることを明らかにした。そして、その開口力と第 2 章で表した人間工学の観点に基づいた収納式引き戸装置の設計条件から、限られた設計スペースの中で、目標の引き戸開口力を実現する回転支点 A と回転ローラー B の適切な位置と、回転ローラー B がスムーズに転送できるガイドレールの形状を見つけ、その設計過程で独創的な曲線手摺を考案した。さらに、歩行機能が衰え、歩行介助を行っている高齢者を対象にし

た試作機のモニタリングを行い、本開発品による、歩行支援の有効性と歩行機能回復の効果を調べた。その結果、得られた結論は以下の通りである。

- (1) 引き戸開口力の最大値は、実測結果に対して本研究のシミュレーション方法を用いることによって誤差 13%以内で一致する。
- (2) 高齢者が無理なく使用できる引き戸の最大開口力 $F_{Axmax} \leq 20N$ を満足することができ、曲率半径 R_1 と R_2 で滑らかに接続できるガイドレール形状を設定した。 R_2 を小さくすると、 $F_{Axmax} \leq 20N$ を満足しない。また、大きくすると、 R_2 との滑らかな接続が困難となる。
- (3) 手摺収納式引き戸をドアとして安全に使用するには、初期開口力 $F_{Ax}(x_A \leq 10mm) \geq 5N$ とする必要がある。 R_1 を大きくすると、初期開口力 $F_{Ax}(x_A \leq 10mm) \geq 5N$ を満たさすことができない。また、 R_2 を小さくすると、 R_2 との滑らかな接続が困難となる。この条件を満足させるための曲率半径 R_1 を設定した。
- (4) 理想的な持ち手の高さで理想的な手摺の高さを考慮して、真っ直ぐな手摺棒で引き戸を構成すると、持ち手と手摺が干渉する問題が起こる。そこで、干渉箇所付近の手摺を曲率半径 $R_G = 1000mm$ で曲げた独創的な曲線手摺を考案した。この工夫によって、曲線手摺は、持ち手との干渉を解決し、持ち手を持つ手が挟まれないための隙間 Δ_{GAP} を確保できることを示した。
- (5) アシストデバイスとガイドレールの曲率半径を適切に組み合わせることによって引き戸開口力を目標 19.6 N 以下に設計できる。
- (6) 引き戸の安全性を確認するための繰り返し開閉試験を実施した。その結果、手摺収納式引き戸は、20 万回の繰り返し開閉に耐えることができた。10 万回から 20 万回の間で、引き戸内蔵車輪と引き戸レールの表面の摩耗により、約 10%の走行抵抗増加が認められたが、使用上問題となることはなかった。
- (7) 以上の(1)～(7)項より、本研究の成果は、①本開発の手摺収納式引き戸がほぼ目標開口力で開口できる回転支点 A とガイドローラーB の位置関係とガイドローラーB が転送するガイドレール形状を見つけたことにより、引き戸開口力が重すぎず、軽すぎず、高齢者および障害者が楽に操作できることと、②緩やかに曲げて曲線形状とした手摺が美的にもうまく収まり、持ち手を持つ手が手摺棒に挟まれることなく安全に操作できること、③および繰り返し試験で製品の安全性を確認できたことである。

第3章参考文献

1. 平成18年度厚生労働省老人保健健康増進等事業報告書. 地域在宅高齢者に対する歩行支援プログラムの健康増進効果に関する研究, p. 29.
2. 金憲経, 吉田英世, 鈴木隆雄, 石崎達郎: 高齢者の転倒関連恐怖感と身体機能—転倒外来受診者について—, 日本老年医学会雑誌, 38, 6(2001), p. 805.
3. WHO Global Report on Falls Prevention in Older Age : WHO Library Cataloguing-in-Publication Data ISBN 978 92 4 156353 6 (NLM classification:WA 288), 20.
4. ケイ・プロダクツ株式会社, 引き戸用手摺, 引き戸装置, 特許出願 2010-102602, 公開番号 2011-231513.
5. ケイ・プロダクツ株式会社, 引き戸用手摺, 引き戸装置, 特許出願 2012-133492, 公開番号 2013-256808.
6. マツ六株式会社, 遮断機手摺 <http://www.firstreform.com/handrail/03.html>.
7. 有限会社伊藤製作所, テスリッコ, <http://tesuri.com/company/>.
8. 伊藤徳朗, 引戸用手摺, 特許出願 2003-340177, 公開番号 2005-105665.
9. 伊藤徳朗, 引戸用手摺, 特許出願 2004-382087, 公開番号 2006-188828.
10. Keiko Ishihara, Mitsuo Nagamachi, Koji Komatsu and Shigekazu Ishihara : Handrails for the Elderly: A Survey of the Need for Handrails and Experiments to Determine the Optimal Size of Staircase Handrails, *Ergonomics*, 1, 3(2002), 175.
11. Donald O. Dusenberry, Howard Simoson and Steven J. DelloRusso : Effect of Handrail Shape on Graspability, *Ergonomics*, 40, 4 (2009), 657.
12. 茅原崇徳, 大山修斗, 瀬尾明彦: 握りやすさの向上を目的とした把持物体の形状最適設計, 日本機械学会論文集, 80, 820(2014), 1.
13. JISZ8500 : 2011, 人間工学—設計のための基本人体測定項目, 日本規格協会.
14. ホクメイ株式会社, 伸縮式の突っ張り型支柱, 特許出願 2002-4743, 公開番号 2003-206640.
15. 角田和雄: ころがり軸受の摩擦, 機械設計便覧, 第3版(1992), 652.
16. 安藤常世: ころがり摩擦, 機械工学便覧, 改定第5版(1968), 3章 34.

17. JISG3522 : 1991, ピアノ線, 日本規格協会.
18. 流石一郎 : 実例から解くばね設計 Q&A 第 5 回 ねじりコイルばねの寿命推定・疲れ限度線図の応用
日刊工業新聞社, 機械設計 47(11), (2003), 130.
19. 田中眞二, 赤澤堅造, 布田健, 佐藤克志 : 高齢者の使用を考慮した引戸の適正な開閉力と操作部形状に関する基礎的検討, 生体医工学シンポジウム 2004 発表(2004), 147.
12. 財団法人ベターリビング : 優良住宅部品評価基準及び付加認定基準の評価基準玄関ドア, BLE FD :
2009(2009).

第 4 章 木質材料の破断強度と疲労強度の見積り方

4.1 緒 言

福祉機器などの機械装置では、製材や合板等の木質材料がしばしば使用される。その設計のため必要となる木質材料の強度は、建築設計規準を参照して求めることが可能であるが、機械設計と建築木材設計では強度設計の考え方が大きく異なる。例えば、機械設計では材料の疲労強度を基に部材形状を設計することが多いが、建築木材設計ではクリープ強度を用いる。また、機械設計で引張強さに相当する材料の破断強さは、建築木材設計では基準強度特性値と呼ばれる。このように建築木材設計においては、機械設計者に理解困難な用語や考え方が多い。

さきに、著者らは図 4-1(a), (b)に示すような、住宅・介護施設・病院等において健康弱者の自立歩行を支援する収納式手摺付きの引き戸[1], [2]を開発した。引き戸収納式手摺を採用することによって、廊下全長にわたって、連続的に手摺を設置することができる。これにより、歩行能力が低下した健康弱者でも、介護者を必要とせず、廊下全長をひとりで伝え歩きすることが可能となる。健康弱者がこの手摺を使用する場合、手摺に掴まる手で体重の大半を支えることがあり、荷重を受ける手摺だけでなく、手摺を取付けている木製引き戸にも繰り返し荷重が生じる。著者らは、その繰り返し荷重条件下の耐久性の評価を行い、安全性を検証[3], [4]した。

本引き戸の開発において、著者らは、安全設計上どのように木質材料の強度データを用いれば良いか、その難しさを実感した。すなわち、まず、機械設計の立場から木質材料の強度の取り扱いが明確ではない。例えば木質材料の疲労強度を扱った文献が少なく、耐久比(疲労強度/破断強さ)についての明確な規準がない。このため安全率を評価することも難しい。また、建築木材設計に関する基準には上記の問題がある。

そこで本稿では、建築設計と機械設計の用語や設計手法の違いを明確にするとともに、木質構造用材料に位置づけられる構造用製材と構造用合板の材料特性について、その強度の求め方や考え方を解説する。そして、第 5 章で合板の強度解析を行う際に使用する破断強度、降伏強度、疲労強度を明らかにして、安全性評価の判断基準とする。

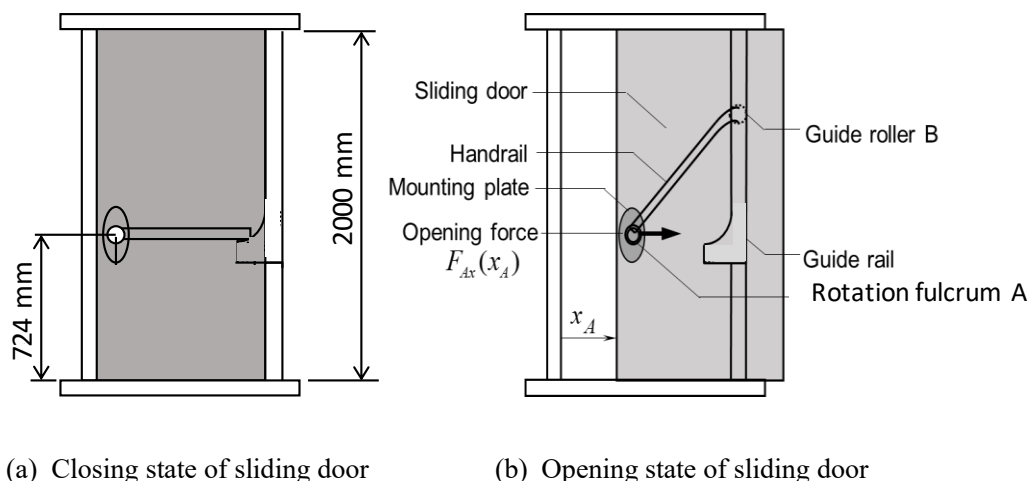


Fig. 4-1 Structure of the sliding door

4.2 木質系構造用材料の基本的性質

日本農林規格(JAS 規格)は、木質系構造用材料の樹種・等級毎の強度および品質を定め、登録認定機関による厳格な審査・管理がなされている。その日本農林規格では、構造用製材、構造用集成材、構造用単板積層材、構造用合板などの木質系構造用材料を総称して構造用材料[5]と定義している。構造用材料は、規格・製造基準等により一定の品質が確保されたもので、構造上要求される強度・耐力、剛性および靱性を有し、かつ、使用期間を通じて要求性能を保持できる耐久性を有するもの[5]とされている。その中から構造用製材と引き戸の設計に関連する構造用合板について以下に述べる。

4.2.1 構造用製材の性質

構造用製材は、製材のうち、針葉樹を材料とするものであって、建築物の構造設計上主要な部分に使用することを主な目的とするものをいう。日本農林規格による製材の分類[6]は、表 4-1 に示す通りである。また、規格に規定された樹種を表 4-1 に示す。表 4-2 は、AIJ に規定される樹種であり、表 4-3 は、ASTM に規定される樹種である。

構造用製材は、品質基準として木材中の節などの欠陥を目視判別する目視等級と、縦弾性係数を測定・判別して強度をより精度良く推定できる機械等級の 2 種類の強度等級区分が制定されている。等級区分することで、製材の強度のばらつきをより狭い範囲に押さえ、木材の強度を合理的に活用することを可能としている。

Table 4-1 Classification of lumber

区 分		説 明	
製 材	構造用製材 (針葉樹)	建築物の構造耐力上主要な部分に使用する針葉樹の製材。樹種は、あかまつ、べいまつ、からまつ、ひのき、すぎ等。	
	目視等級区分 構造用製材	構造用製材のうち、節等の欠点を目視測定し、1~3等級に区分するもの。	
	甲種構造材	主として高い曲げ性能を必要とする土台、大引、根太、梁、桁等を使用。	
		構造用 I	木口短辺(厚さ)が36mm未満、および木口の短辺が36mm以上、かつ木口の長辺が90mm未満のもの。
		構造用 II	木口の短辺が36mm以上、かつ木口の長辺が90mm以上のもの。
	乙種構造材	主として圧縮性能を必要とする部分に使用。通し柱、管柱、床束等。	
	機械等級区分 構造用製材	機械で弾性係数を測定し、E50~E150までの6等級に区分するもの。材面品質は目視等級区分乙種構造用3級の基準を満たすもの。	
	造作用製材	敷居、鴨井、壁、その他の建築物の造作に使用する針葉樹製材のもの。	
	下地用製材	建築物の屋根、床等の下地に使用する針葉樹製材のもの。	
	広葉樹製材	製材のうち、広葉樹を材料とするもの。	

Table 4-2 Tree species specified by AIJ

針葉樹	あかまつ、べいまつ、からまつ、ダフリカ、からまつ、ひば、ひのき、べいつが、えぞまつ、とどまつ、すぎ
広葉樹	かし、くり、なら、ぶな、けやき、アビトン、ラワン
合板	集成材、構造用合板1級、構造用合板2級

Table 4-3 Tree species specified by ASTM

針葉樹	Baldcypress, Cedar, Douglas fir, Fir, Hemlock, Larch, Western, Pine, Southern yellow, Redwood, Spruce, Tamarack
広葉樹	Alder, Ash, Aspen, Basswood, Birch, Butternut, Cherry, Chestnut, Cottonwood, Elm, Hackberry, Hickory, Honeylocust, Locust, Magnolia, Maple, Oak, Poplar, Balsam, Sweetgum, Sycamore, Tupelo, Walnut, Yellow poplar

木材は近似的にみると直交する3つの軸を持つ直交異方性材料であると定義されている[7]。その3軸の方向と面を図4-2に示し、図4-3にスギの3方向引張試験の応力ひずみ線図を示す。図4-3は、沢田[7]による繊維方向(L)、放射方向(R)、接線方向(T)の実験データをまとめたものである。図において、繊維方向(L)を例にとると、線分OC部分が直線域で線分CA部分が曲線域であり、C点が比例限度、A点が破断点である。繊維方向(L)では、針葉樹材のスギは破壊応力の点まで直線的である。

各方向の応力ひずみ線図を比較すると、強度と共に弾性係数に相当する応力ひずみ線図の傾きも、繊維方向(L) > 放射方向(R) > 接線方向(T)の順である。日本農林規格には、繊維方向(L)の材料特性値のみが規定されており、放射方向(R)および接線方向(T)を強度部材に使用することは無い。

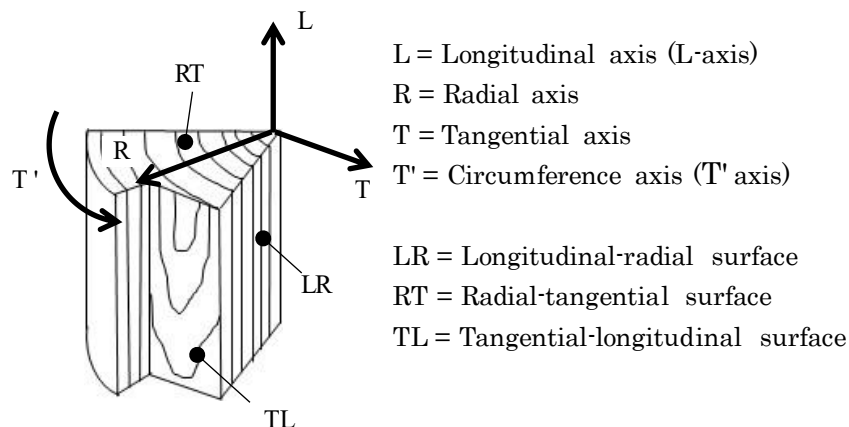


Fig. 4-2. Axes and surfaces of wood

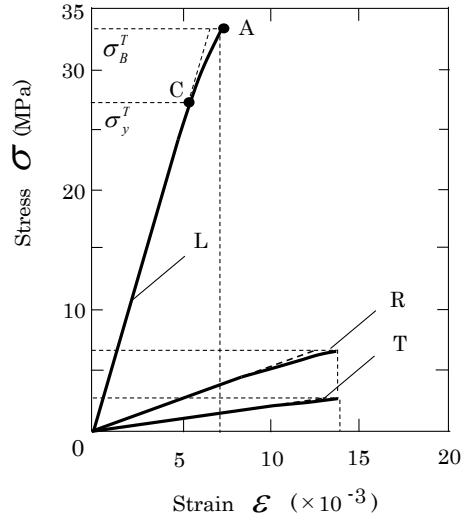


Fig. 4-3 Tensile stress-strain diagram of sugi

4.2.2 構造用合板の性質

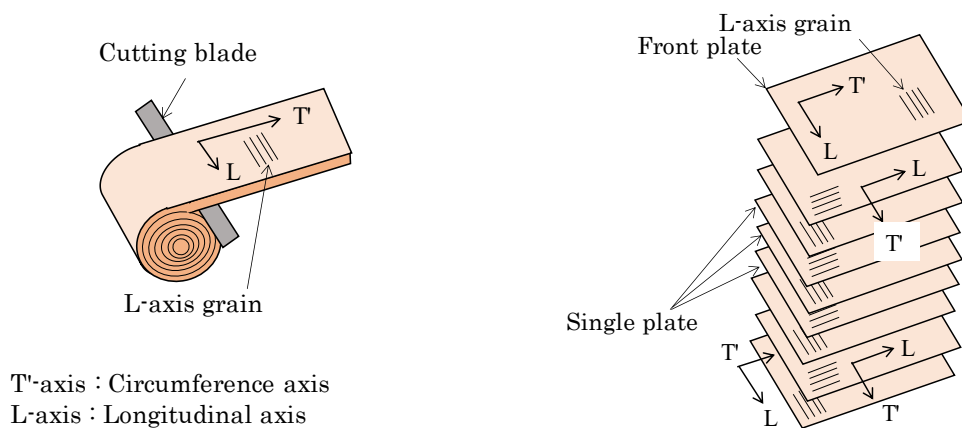
合板は、木材の調湿作用、加工性等の優れた特性を備え、木材の欠点を改善し、単一板材より強く、板幅が広く、伸縮が少ない材料に作り上げた一種の合成板材である。構造用合板は、合板のうち建築物の構造設計上主要な部分に使用するものであることが「合板の日本農林規格[8]」で定義されている。すなわち、強度が問題となるところに使われることを想定して作られた合板である。曲げ強度と縦弾性係数値を指標として、強度等級 1 級と 2 級に分けられている。用途は 1 級 2 級共に筋交いが不要な耐力壁材、屋根下地材、床下地材等であり、その中でも 1 級は構造計算を必要とする場所に用いられている。本稿では構造用合板 1 級を対象として述べる。

構造用合板の強度はその製造方法に直結するので、以下に製造方法について述べる。図 4-4(a)に示すように、大根の桂むきのように原木を切削する。次に、薄い単板にしたものを、接着剤を塗布して図 4-4(b)のように繊維の方向を 90°互い違いに重ね合わせ、圧接成型するものである。図 4-5 に桑村[9]による構造用合板の引張応力ひずみ線図を示す。この試験材は、公称厚み 21 mm の構造用合板 1 級、板面の品質 B-C、積層数 9 プライ(枚とも言う)のラワン合板である。試験荷重の方向は直交する表層板の L 方向、T 方向であり、両方向とも直線的で、その終点が破断点となっており、脆性的である。また、図 4-5 において、表層板の L 方向の引張りが T 方向より大きな値となっているのは、積層数が奇数であり、強度

の強い L 方向の枚数が 1 枚多いことによるものである。奇数積層は外観上の理由等により、表裏の繊維方向を揃えているためである。繊維方向の違いによる強度については、日本農林規格で表板の表層繊維と平行方向および直角方向の引張強さが規定されている。この奇数積層が合板に及ぼす強度の違いを以下に述べる。

表 4-4 は図 4-3 に示したスギ材[7]と、ラワン材単板[9]、および図 4-5 に示したラワン合板の L 方向と T および T' 方向の引張強さの比較である。図 4-6(a)に T' 方向の板切り出し図を示し、図 4-6(b)に T 方向の板切り出し図を示す。表 2 よりスギ材、ラワン材単板ともに L 方向が T および T' 方向に対して強度比 0.08 および 0.03 と異方性が強い。T および T' 方向は、年輪目を引っ張るため強度的に弱い。これに対し、L 方向と T' 方向を交互に重ね合わせたラワン合板は、表板の方向による強度比(T'/L)は 0.65 であり、等方材に近づき、合板が原木の異方性を緩和し強度を向上させ得ることが分かった。

次に、日本農林規格に規定された構造用合板 1 級 C-C 等級材において、表板の繊維方向の違いによる基準許容応力度(引張り) [5]の差を表 4-5 で比較してみる。合板の強度比 $\sigma_B^{T'}/\sigma_B^L$ の値は、プレート数 N=3 と N=5 を除いて、ほぼ 1 である。プレート枚数の多い合板は均質になるため、N=7 以上の合板は、均質材料とみなすことができる。しかし、合板の板厚方向の特性は異なるものと思われるが、これに関する研究が見当たらない。従って、本研究で取り扱う合板は、等方材として取り扱う。なお基準許容応力度については、4.3 項で説明する。



(a) Peeling a log into a single plate

(b) Nine-ply lamination of single plates

Fig. 4-4 Creating and laminating single plates

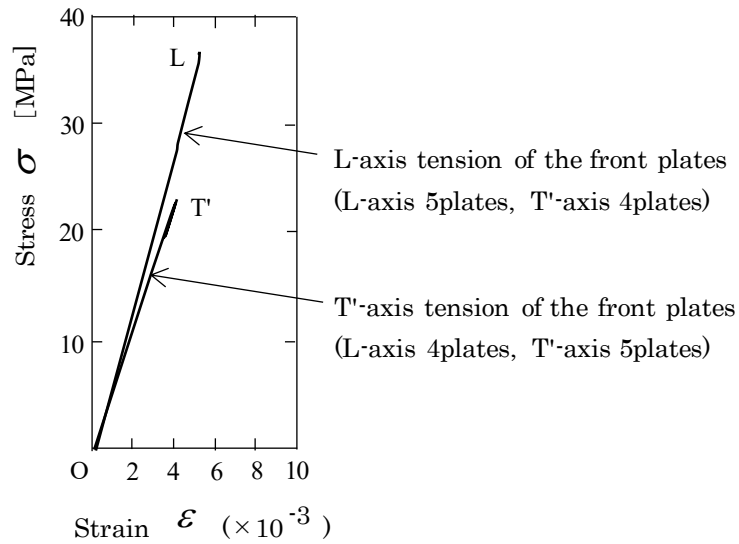


Fig. 4-5 Tensile stress-strain diagram for lauan plywood, the first-grade structural plywood

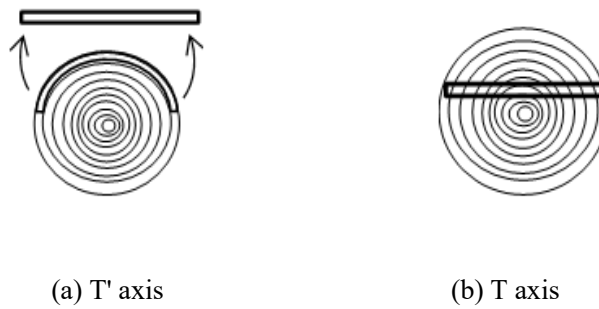


Fig. 4-6 Explanatory drawing of T' and T axes

Table 4-4 Comparing strength ratios of L-axis to T- or T'-axis using sugi, a lauan single plate, and lauan plywood

Type of board	Static strength [MPa]			Strength ratio
	σ_B^L in L-axis	σ_B^T in T-axis	$\sigma_B^{T'}$ in T'-axis	
Sugi wood	33.3	2.63	-	$\sigma_B^T / \sigma_B^L = 0.08$
Lauan single plate	45.8	-	1.37	$\sigma_B^{T'} / \sigma_B^L = 0.03$
Lauan plywood	36.4	-	23.6	$\sigma_B^{T'} / \sigma_B^L = 0.65$

Table 4-5 Static tensile strength in L- and T'-axes by varying number of sugi plates N specified as first- C-C grade plywood by JAS (AIJ 2003; AIJ 2006).

Number of plates N	Plywood thickness t_p [mm]	Single plate thickness t_s [mm]	Static strength [MPa]			Strength ratio $\sigma_B^{T'}/\sigma_B^L$
			σ_B^L in L-axis (front plate)	$\sigma_B^{T'}$ in T'-axis (front plate)	$\sigma_B^{ave} = (\sigma_B^{T'} + \sigma_B^L)/2$	
3	5.0	1.6	20.6	11.9	16.3	0.58
3	6.0	2.0	17.1	15.4	16.3	0.90
5	7.5	1.5	18.9	11.9	15.4	0.63
5	9.0	1.8	15.4	15.4	15.4	1.00
5	12.0	2.4	15.4	15.4	15.4	1.00
7*	15.0	2.1	11.9 (18.9)*	18.9 (11.9)*	15.4	1.59 (0.63)*
7	18.0	2.5	15.4	15.4	15.4	1.00
7	21.0	3.0	15.4	15.4	15.4	1.00
9	24.0	2.6	15.4	15.4	15.4	1.00
Average value			16.2	15.0	15.6	0.97

* when number of plates $N=7$ and plywood thickness $t_p=15\text{mm}$, the values (AIJ 2003; AIJ 2006) may have some misprints since $\sigma_B^{T'}/\sigma_B^L > 1$. Presumed correct values are indicated in parentheses.

4.3 構造用材料に対する建築設計と機械設計の強度評価方法

機械設計上材料の破断強さは、降伏点とともにすべての基準になる。木質構造用材料を用いた構造設計を機械設計的に行う場合には、建築設計で用いられる強度用語との整合が必要となる。以下に静的強度と環境劣化、ならびに疲労強度について考察する。

4.3.1 破断強さ σ_B に相当する「基準強度特性値 ${}_0F$ (建築設計)」

木質構造設計規準[5]では、構造用材料の引張り、圧縮、曲げ等の標準試験で得られた破断強さに統計処理手法を施して求められた値を基準強度特性値 ${}_0F$ と定めている。この ${}_0F$ は、機械設計的には破断強さ σ_B に相当し、次式で表すことができる。

$${}_0F \text{ (建築設計)} = \sigma_B \text{ (機械設計)} \quad (1)$$

金属材料と違い、木材では個々の強度差がかなり大きい。木材は生長の過程や環境変化等で、材料特性が変動するため、無欠点の理想的な小試験体ですら強度性能にばらつきが生じる。この他に製材の長

手方向と木材繊維の傾斜度合いや節等によっても強度に影響を受ける。そこで、建築物の構造設計ではこのようばらつきを考慮して、実験データに基づいて統計学的に推定した安全な値を用いている。

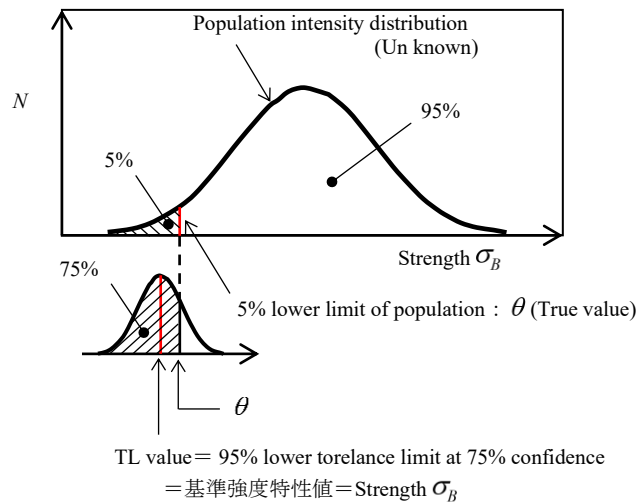


Fig. 4-7 5% lower limit at 75% confidence level

木質構造設計規準[5]によると、標準試験体を用いた標準試験により得られた材料の破断強度の値を適当な分布(正規分布、ワイブル分布等)にあてはめ、その強度分布の75%信頼水準における5%下限値を基準強度特性値 σ_F と定義している。すなわち、100本に5本は基準強度を下回ることを許して、弱い方から5%に相当する値を採用するということである。図4-7に示すTL値が75%信頼水準における5%下限値である[10, 11]。

4.3.2 環境劣化を考慮した破断強さに相当する「基準材料強度 F (建築設計)」

構造用合板のように、接着剤を使用した材料においては、破断強度値に環境に対する時間劣化を考慮する必要がある。したがって、接着材を使用しないものは時間劣化を考慮しない。合板は、接着部分が熱・温度・湿度・紫外線・水濡れ等の使用環境によって劣化する。そこで木質構造設計基準[5]では、基準強度特性値 σ_F に劣化影響係数 K_t を乗じたものを基準材料強度 F と定義している。ここでは、劣化影響係数 K_t を機械設計的に環境劣化係数 ξ とする。構造用合板で ξ に相当する K_t は基準強度特性値 σ_F に対して $\xi = 6/7$ と定められ、引張り・圧縮にも用いられている。これらを、建築設計に用いる場合は式(2)で表される。一方、機械設計に用いる場合は式(3)で表すことができる。

$$\text{基準材料強度(建築設計)} F = {}_0F \times K_t \quad (2)$$

ここで、 ${}_0F$ =基準強度特性値、 K_t =劣化影響係数

$$\begin{aligned} \text{基準材料強度(建築設計)} F &= \text{破断強さ(機械設計)} \sigma_B \times \xi \\ &= \sigma_B \times 6/7 = 0.86 \sigma_B \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 K_t (建築設計) = ξ (機械設計) = $6/7 = 0.86$

4.3.3 疲労限 σ_w に相当する「基準許容応力度 ${}_0f$ (建築設計)」

負荷の繰り返しの下で使われる場合、機械設計では疲労限 σ_w が用いられる。構造用材料の基準許容応力度 ${}_0f$ は、破断強度に対して環境劣化と経年低下および弾性低下を考慮したもので、結論として機械設計の疲労限 σ_w に相当する。そのことは、4.5節で考察する。

まず、木材設計による構造用合板の基準許容応力度 ${}_0f$ は、式(4)で求められる。

$$\begin{aligned} \text{基準許容応力度 (建築設計)} {}_0f &= F \times K_0 \times K_f \\ &= ({}_0F \times K_t) \times K_0 \times K_f \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 F = 基準材料強度、 ${}_0F$ = 基準強度特性値、 K_t = 劣化影響係数（接着剤を用いないものは $K_t = 1$ ）、 K_0 = 基準化係数、 K_f = 安全係数。

これを機械設計では、式(5)、(6)で表すことができる。

$$\begin{aligned} \text{基準許容応力度 (建築設計)} {}_0f &= \sigma_w \text{(機械設計)} \\ &= \sigma_B \text{(機械設計)} \times \xi \times \zeta_1 \times \zeta_2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &= \sigma_B \times 0.86 \times 1/2 \times 2/3 \\ &= 0.29 \sigma_B \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)より、疲労耐久比(疲労限 σ_w / 破断強さ σ_B)は $\sigma_w / \sigma_B = 0.29$ である。ここで、 $K_0 = \zeta_1 = 1/2$ 、 $K_f = \zeta_2 = 2/3$ とされており、 $K_0 = \zeta_1$ を経年強度低下係数と呼ぶことにする。この ζ_1 は、建築物の部材に250年間にわたって荷重が作用し続けることを考慮したもので、材料のクリープ破壊特性に基づいて決定される係

数である。また、 ζ_2 は破断強さを弾性限度まで低く見積もった係数で、一種の安全率とみなすこともできる。

4.4 日本と米国の木材の強度評価方法

木材の許容応力を算出する方法は北米を中心とする規格化団体である ASTM インターナショナル規格 ASTM D245 [12] および ASTM D2555 [13] 示されている。それは木材の無欠点小試験体の強度値から、許容応力を算出する方法である。日本では ASTM を参考にして、日本産木材の強度および許容応力が日本農林規格に定められている。その詳細は日本建築学会(AIJ)の Standard for structural design of timber structures [14] に詳しく解説されている。ここでは、ASTM と AIJ に従って木材の強度評価方法と木材の疲労耐久比を説明する。そして、本研究で引き戸に使用した合板の強度を、ASTM と AIJ の評価方法で検証する。

4.4.1 ASTM and AIJ における 繰り返し荷重下の木質材料の allowable stress の見積方法の比較

表 4-6 に、木材における静的強度の低減係数を ASTM D245 で算出する方法と、AIJ で算出する方法を示す。ここで評価する木材は、日本農林規格に規定される構造用合板 1 級の板厚 15mm 材である。引き戸木材の詳細仕様は、4.1 節に記載している。

ASTM の算出方法では(a)Adjustment factor, (a1) Degradation Factor, (b) Strength ratio, (c) Seasoning adjustment, (e) Special factor があり、(a2) Safety factor, (d) Environmental coefficient がない。AIJ の算出方法では(a1) Degradation Factor, (a2) Safety factor, (d) Environmental coefficient があり、(a)Adjustment factor, (b) Strength ratio, (c) Seasoning adjustment, (e) Special factor がない。表中で規定にはないが、算出して求めることのできる係数を()で示す。これらの低減係数の内容と ASTM および AIJ それぞれによる算出方法を以下に説明する。各係数の頭に付けている(a)~(e)の記号は、表 4-7 に示す係数と合致する。

4.4.2 Adjustment factor , Degradation Factor, Safety factor

まず、表 4-6 における ASTM の(a)Adjustment factor, (a1) Degradation Factor, (a2) Safety factor を説明する。(a) Adjustment factor は、荷重継続時間による強度の劣化と安全率を考慮した係数である。針葉樹における、無欠点の木材の強度に適用される曲げと引張の Adjustment factor は 1/2.1 であり、圧縮は 1/1.9 である。ASTM D245 では、(a1) Degradation Factor と(a2) Safety factor をまとめて(a) Adjustment factor として

示している。(a1) Degradation Factor は、図 4-8 から求められる。図 4-8 は、ASTM D245 に規定されているもので、マジソンカーブと呼ばれる曲線である。この曲線は、ウイスコン州マディソンにある Forest Products Laboratory が行った無欠点小試験体の曲げ試験による結果を元にしたものである。

この曲線は荷重持続時間(Load duration)10 分間の静的強度を基準として、荷重持続時間の異なる強度を、その基準強度 (100%) との比で表わしている。横軸は荷重持続時間を対数表示している。実線が ASTM の値を示す。ASTM に規定される荷重継続期間の最大は 50 年である。ここで、木材の疲労寿命を考察する観点から本稿では、後述する AIJ に合わせて、荷重継続期間を 250 年とする。AIJ では、図 4 の ASTM の曲線を延長して、荷重継続期間 250 年における Degradation Factor の推測値 0.57 を得る。その値から、曲げの (a2) Safety factor は次のように算出できる。(a) Adjustment factor 1/2.1 と (a1) Degradation Factor = 0.57 より、(a2) Safety factor は、 $1/(2.1 \times 0.57) = 1/1.20$ となる。

これに対し、AIJ では、(a) Adjustment factor を規定せず (a1) Degradation Factor と (a2) Safety factor を規定している。図 4-8 の破線が AIJ の (a1) Degradation Factor である。AIJ では、ASTM に規定されている図 4-8 に、荷重継続期間 10 分の点 S と 3 ヶ月の点 M を求め、それを直線で結び、250 年の点を求めて、基準強度としている。AIJ の (a1) Degradation Factor は、荷重継続期間 250 年の値 0.5 を用いる。(a2) Safety factor は、破断強さを弾性限度まで低く見積もる係数であり、AIJ では、通常 2/3 としている。

4.4.3 Strength ratio

(b) Strength ratio は、ASTM D245 に規定された、実大材の節(knot)や割れ等の欠陥を考慮する低減係数である。無欠陥小試験体は、これらの欠陥が無い。実大材の許容応力を算出するには、これらの欠陥を考慮して、無欠陥小試験体で得られた強度に相応の欠陥に相当する係数を乗じて低減する必要がある。その欠陥の種類、およびその大きさにより強度を低下させる割合を強度比と呼んでいる。欠陥の種類には、節と繊維の傾斜、割れがある。強度比は、これらの欠陥の内、強度を低下させる割合が最も大きいものを採用することとなっている。

本研究で取り扱った日本農林規格構造用合板 1 級 C-C 材の基準では、節の大きさは、50 mm 以下とされている。ここで、合板は図 4-4(a) に示すように桂剥きで製作されるため、繊維の傾斜が非常に小さいため、強度比を 1.0 とする。従って、強度比は節によるものが対象となる。

節に対する曲げの Strength ratio は、合板が広幅であることを考慮して ASTM D245 に規定される最大板幅 610 mm の端部に 51 mm の節がある場合の 0.78 とする。縦引張りの Strength ratio は、曲げの 0.55 倍とされている。これは、構造用木材の引張強度が、曲げや圧縮の強度よりも節や木目繊維の編斜 (grain deviation) などの特性により敏感に影響を受ける為とされていることによるものである [20]。縦圧縮の Strength ratio は、節の大きさのみより強度比を算出するようになっており、51 mm の節の強度比は曲げの場合と同じく 0.78 である。AIJ では、木材の等級で欠陥の形状、量を規制して Static strength を定めているので、係数として表していない。

4.4.4 Seasoning adjustment

(c) Seasoning adjustment は木材の含水率を考慮した ASTM D245 に規定された係数である。木材の強度は、含水率の減少とともに増加する。日本農林規格の構造用合板 1 級の含水率は 14%以下と規定されている。それに対応する ASTM D245 の規定では、含水率 15%以下の場合の Seasoning adjustment が規定されており、その値は曲げで 1.35、縦引張で 1.35、縦圧縮で 1.75 である。

4.4.5 Environmental coefficient

(d) 環境影響による劣化を考慮した係数 (Environmental coefficient) は、AIJ の係数で、接着材を使用する合板等の紫外線や水濡れによる劣化を考慮した係数である。合板の曲げ強さに対する Environmental coefficient は、 $\frac{3}{4}$ である。圧縮強さ、引張強さに対する Environmental coefficient は、 $\frac{6}{7}$ である。また、接着材を使用しない木材に対する Environmental coefficient は、1.0 である。

4.4.6 Special factor

(e) Special factor は、最弱リンク理論に従って、木材寸法が大きくなるに従って強度が低下することを反映する係数である [15]。具体的には、2 インチより大きな材料に対して強度を低減する ASTM D245 に規定された係数であり、曲げ強度のみに適用されている。幅 140 mm 材の Special factor を表 4-6 に示す。AIJ にこの規定はない。本研究は、ドアに使用する合板が対象であり、梁材として使用しない。従って、ASTM、AIJ とともに、この係数を 1.0 とする。

4.4.7 Product of coefficients equivalent to ratio of fatigue limit to static strength

以上に示す係数 (a1),(a2), (b), (c), (d), (e) の積を表 4-6 の (f) Product of coefficients に示す。ASTM では静的強度の 0.21~0.43 倍であり、AIJ では静的強度の 0.25~0.29 倍となっている。これらの結果から、

ASTM と AIJ のそれぞれ小さい方の値を採用すると安全側に有利となる。したがって、Product of coefficients は、曲げは AIJ の 0.25、引張りは ASTM の 0.21、圧縮は AIJ の 0.29 を採用すると安全である。

ここで、表 4-6 に示す Product of coefficients α_j の圧縮強度が 0.43 で、引張強度 0.21、曲げ強度 0.34 と比較して大きいことを説明する。この値 Product of coefficients α_j に大きく影響を与える係数は、Safety factor α_{a2} と Strength ratio α_b である。この二つにより、圧縮強度が引張強度と曲げ強度より大きくなる。その理由は、Adjustment factor α_a により決まる ASTM の Safety factor α_{a2} は、破断強さ σ_B を弾性限度 σ_y まで低減する係数であり、曲げと引張り $\alpha_a = 1/1.25$ に対し、圧縮の $\alpha_a = 1/1.14$ で小さい値となっていることによるものである。また、Strength ratio α_b は、木材の節や亀裂などの欠陥を考慮する係数であり、ASTM では、曲げ強度と圧縮強度よりも引張強度が節や亀裂の影響を受けやすいため、引張の Strength ratio α_b を曲げの 0.55 倍としていることからくるものである。

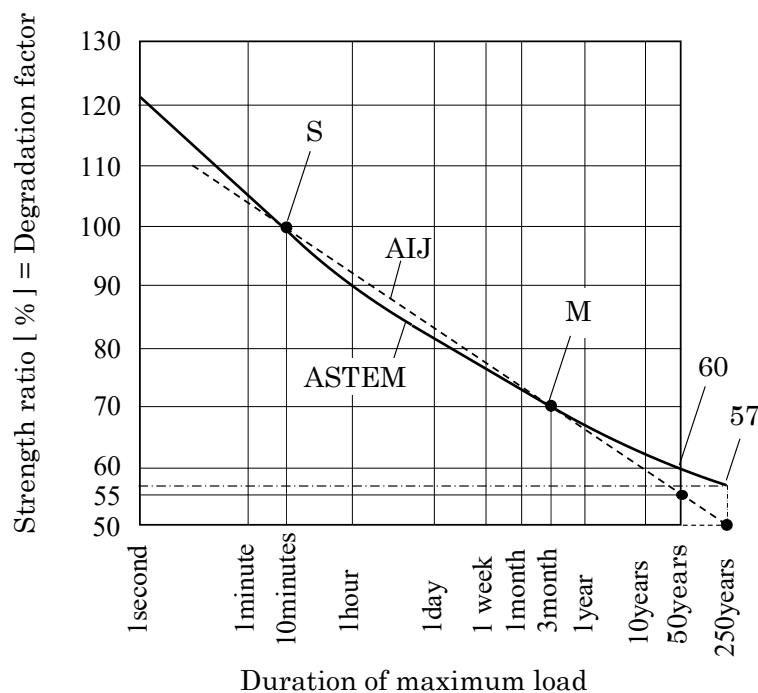


Fig.4-8 Relation of strength ratio to duration of load by ASTM and AIJ

Table 4-6. Method for calculating σ_w/σ_B from coefficients α_a to α_f defined in ASTM and AIJ when load duration is 250 years*⁵

Coefficients	Bending		Tension parallel to grain		Compression parallel to grain	
	ASTM	AIJ	ASTM	AIJ	ASTM	AIJ
(a) Adjustment factor α_a in ASTM, $\alpha_a = (a1) \times (a2)$ in AIJ	1/2.2	1/3	1/2.2	1/3	1/2.0	1/3
(a1) Degradation factor α_{a1} in ASTM and AIJ	0.57 * ¹	0.5	0.57 * ¹	0.5	0.57 * ¹	0.5
(a2) Safety factor α_{a2} in AIJ (equivalent to $\sigma_y/\sigma_B =$ ratio of yield strength to static strength ($\alpha_{a2} = \sigma_y/\sigma_B$))	(1/1.25)* ²	2/3	(1/1.25)* ²	2/3	(1/1.14)* ²	2/3
(b) Strength ratio α_b prescribed in ASTM	1.0	(1.0)* ²	1.0 × 0.55	(1.0)* ²	1.0	(1.0)* ²
(c) Seasoning adjustment α_c prescribed in ASTM	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)	1.0	(1.0)
(d) Environmental coefficient α_d prescribed in AIJ	(3/4)* ³	3/4	(6/7)* ³	6/7	(6/7)* ³	6/7
(e) Special factors α_e prescribed in ASTM	1.0	1.0	(1.0)* ²	(1.0)* ²	(1.0)* ²	(1.0)* ²
(f) Product of coefficients $\alpha_f = \alpha_a \times \alpha_b \times \alpha_c \times \alpha_d \times \alpha_e$ (equivalent to $\sigma_w/\sigma_B =$ ratio of alternating fatigue limit to static strength ($\sigma_w/\sigma_B = \alpha_f$))	0.34	0.25 * ⁴	0.21 * ⁴	0.29	0.43	0.29 * ⁴

*¹ The values of α_a in ASTM are calculated setting the load duration at 250 years according to AIJ.

*² Values not prescribed in ASTM or AIJ are in parentheses.

*³ Since α_d value for plywood is not prescribed in ASTM, the value in AIJ is indicated.

*⁴ The values recommended by the authors are shown in **bold** type.

*⁵ Although the values in this table are for the first-grade structural plywood material 15 mm thick made of softwood (sugi) specified in JAS, this method can be applied to plywood made of hardwood.

4.5 構造用合板における疲労限の一考察

4.5.1 木材の疲労限

前項、表 4-6 の説明で最終的に必要となるのは、各係数の積として求まる $\alpha_f = \alpha_a \times \alpha_b \times \alpha_c \times \alpha_d \times \alpha_e$ である。ASTM と AIJ では、この α_f はあくまで各係数の積であり、それが疲労強度に直接結びつくものではない。ここでは、機械設計の立場から、この最終的に考慮すべき α_f が、結果として耐久比に対応することを示す。ここで、耐久比 σ_w/σ_B とは、それぞれの負荷荷重における両振り疲労限度 σ_w と静的強度 σ_B の比である。

4.5.2 構造用合板における疲労限の考察

木質材料の繰り返し荷重に対する疲労試験は極めて少ない。その中でも比較的新しい結果を図 4-9 に示す。この図は今山ら[16] の曲げ疲労試験による $S-N$ 曲線である。試験片は、樹齢 40 年のスギ樹幹丸太(含水率は 12~15%)の成熟材から採取し、柁目長手方向中央の集中荷重による両振り繰り返し曲げ応

力を与える。縦軸は、曲げ強さ σ_B に対する曲げ応力振幅 σ_a の比 σ_a / σ_B である。この図より、曲げ疲労耐久比 $\sigma_w / \sigma_B = 0.32$ が読み取れる。

他の研究例として、図 4-10 に示すように、安藤ら[17]は日本のブナ(Japanese beech)の両振りねじり疲労試験の S-N 曲線を求めている。図 4-10 は、繰返し数 10^5 回における、ねじり疲労限耐久比 $\tau_w / \tau_B = 0.32$ を示している。安藤等は、この 0.32 付近が疲労限と推定できると結論付けている。次に、図 4-11 に示すように、満久ら[18]はヒノキ集成材の両振り回転曲げ疲労の S-N 曲線を求めている。繰返し数 10^7 回における曲げ疲労限耐久比 $\sigma_w / \sigma_B = 0.38$ である。また、奥山ら[19]は、木材の片振り引張疲労と片振り圧縮疲労の研究を行っている。しかし、両振り疲労の考察はしていない。木質構造設計規準[5]に疲労強度に関する記載がない等、構造用合板の疲労試験データを見出すのは容易ではない。そのような中で、60 年ほど前の満久の木質材料の疲労に関する解説[20]がある。木質構造材料の耐久比 σ_w / σ_B は、規格破断強度に対して $\sigma_w / \sigma_B = 0.22 \sim 0.33$ の範囲にあることが示されている。しかし、これは合板に限定されたものではない。

次項の表 4-7 に、これまでに入手できた木材の耐久比 σ_w / σ_B をまとめて示す。表 4-7 によれば耐久比は、0.29~0.33 で、全て満久の報告した範囲に含まれている。また、著者らが収納式手摺[3, 4]の開発において、表 4-7, No.1 に示す引き戸強度検討に採用した構造用合板の耐久比 0.3 は、表 4-7, No.2 に示す構造用合板の基準許容応力度 σ_f の耐久比 0.29 とほぼ等しい値であった。

本稿で著者らが算出した構造用合板の基準許容応力度(建築設計) σ_f が機械設計から見た疲労限 σ_w に相当する値であることも明らかである。

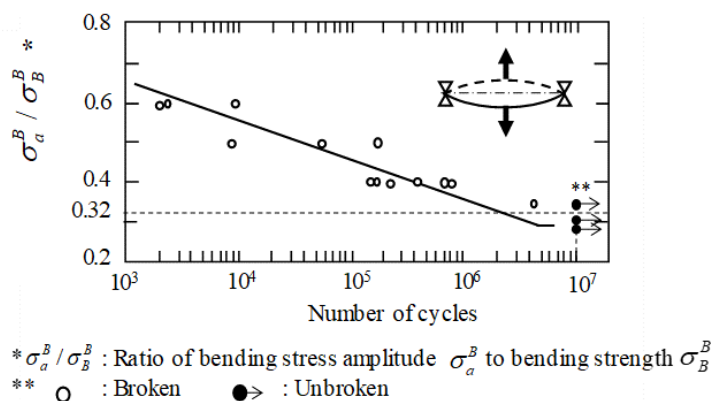
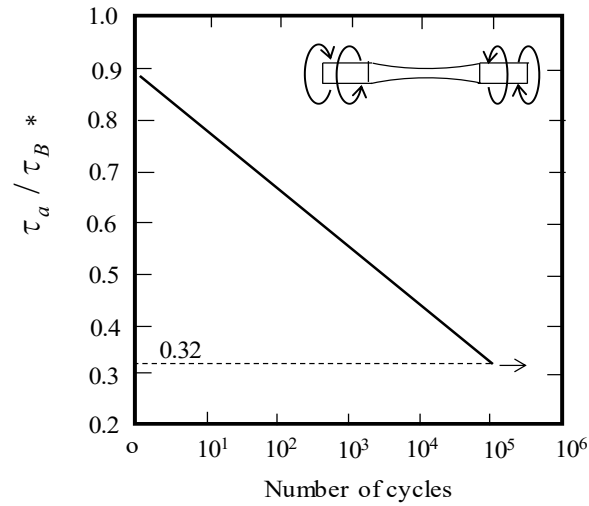
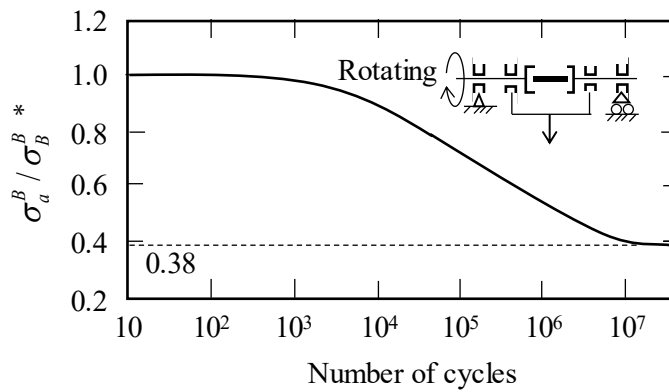


Fig. 4-9 S-N curve in repeated bending fatigue of Japanese sugi



* τ_a / τ_B : Ratio of shear stress amplitude τ_a to shear strength τ_B

Figure 4-10 S-N curve of torsion fatigue test for Japanese beech



* σ_a^B / σ_B^B : Ratio of bending stress amplitude σ_a^B to bending strength σ_B^B

Figure 4-11 S-N curve of rotating bending fatigue test for Japanese cypress laminated

Table 4-7 Calculation example of endurance ratio σ_w / σ_B

No.	Calculation example of endurance ratio σ_w / σ_B	σ_w / σ_B
1	著者らが用いた構造用合板の耐久比[4]	0.30
2	構造用合板の耐久比 (式(6)参照)	0.29
3	構造用製材の耐久比 (式(5),(6)参照, $\xi = 1.0$)	0.33
4	スギ材の曲げ疲労耐久比[16] (図 4-9 参照)	0.32
5	ブナのねじり疲労耐久比[17] (図 4-10 参照)	0.32
6	ヒノキ集成材の回転曲げ疲労耐久比[18] (図 4-11 参照)	0.38

4.6 建築設計用語の機械設計との対比と事例

表 4-8 に建築設計強度用語の機械設計との対比をまとめて示す。表 4-9 は、木質材料設計規準[5]に示される構造用製材(甲種構造材)の繊維方向(L)の強度を示す。表 4-9 から構造用製材の耐久比は 0.33 と読み取れる。

Table 4-8 Terms used in architectural and mechanical design

建築設計		機械設計		備 考
名 称	記号	名 称	記号	
基準強度特性値	${}_0F$	破断強さ	σ_B	統計処理による規格値 ${}_0F = \sigma_B$
基準材料強度	F	劣化を考慮した破断強さ	$0.86 \sigma_B$	環境による接着材の時間劣化を考慮した強度 $F = 0.86 \sigma_B$
基準許容応力度	${}_0f$	疲労限	σ_w^*	両振り繰り返し応力による疲労強度 ${}_0f = 0.29 \sigma_B$
劣化影響係数	K_t	環境劣化係数	ξ^*	環境による接着材の時間劣化を考慮する係数
基準化係数	K_o	経年強度低下係数	ζ_1^*	クリープを考慮する係数
安全係数	K_r	一種の安全率	ζ_2^*	破断強さを弾性限へ低減するための係数

* Symbols used by the author in this article

Table 4-9 Strength characteristic value of structural lumber in the grain direction (endurance ratio σ_w^T / σ_B^T 0.33)

樹種	等級	縦弾性係数 E (GPa)	*1 基準強度特性値 ${}_0F$	*1 基準許容応力度 ${}_0f$
			*2 破断強さ σ_B^T (MPa)	*2 疲労限 σ_w (MPa)
スギ	1 級	4.5	16.2	5.4
	2 級		15.6	5.2
	3 級		13.8	4.6
ヒノキ	1 級	8.5	22.8	7.6
	2 級		20.4	6.8
	3 級		17.4	5.8

*1 Architectural design term, *2 Mechanical design term

4.7 引き戸に使用した構造用合板一級材の強度性能値

これまでの研究より、引き戸木材に使用した構造用合板一級の強度性能値を見積もる。表 4-10 は、木質構造限界状態設計指針(案)・同解説[21] に示される構造用合板 1 級材の表板の繊維方向の値であり、板厚 6 種類を抜粋して機械特性を示したものである。これまでに、表 4-6 に示した Product of coefficients $\alpha_j = \text{ratio of fatigue limit to static strength } \sigma_w / \sigma_B$ および基準許容応力度(建築設計) ${}_0f$ が機械設計から見た疲労限 σ_w あることを明らかにした。ここで、表 4-10 に CC 等級材の強度性能を示す。基準強度特性値(建築設計) ${}_0F$ から機械設計の強度解析で必要となる降伏強度、疲労限を算出して表 4-11 に示す。尚、降伏強度 σ_y は、表 4-6 に示す Safety factor α_{a2} により求めたものである。

Table 4-10 Structural plywood first-class top plate Strength characteristic value in the grain direction

厚さ (mm)	積層数	縦弾性係数 E (GPa)	*1 基準強度特性値 ${}_0F$		
			*2 破断強さ σ_B (MPa)		
		A-A~D-D	曲げ σ_B^B	引張り σ_B^T	圧縮 σ_B^C
			A-C, B-C, C-C	A-C, B-C, C-C	A-C, B-C, C-C
5.0	3	5.5	37.2	20.6	13.6
9.0	5	4.5	27.6	15.4	11.9
12.0	5	4.5	23.6	15.4	11.9
15.0	7	3.5	21.6 (23.6)* ³	11.9 (15.4)* ³	8.7(11.9)* ³
21.0	7	4.5	23.6	15.4	11.9
24.0	9	4.5	23.6	15.4	11.9

*1 Architectural design term, *2 Mechanical design term

*3 When number of plates $N=7$ and plywood thickness $t_p=15\text{mm}$, the values (AIJ 2003; AIJ 2006) may have some misprints since $\sigma_B^{T'}/\sigma_B^L > 1$ in Table 4-5. Presumed correct values are indicated in parentheses.

Table 4-11 Plywood material properties estimated from AIJ and ASTM used for FEM analysis

Items	Plywood for door		
		ASTM	AIJ
Elastic modulus E		3.5 GPa	
Poisson's ratio ν		0.4	
Ultimate strength σ_B provided by AIJ	Bending σ_B^B	21.6 MPa	
	Tension σ_B^T	11.9 MPa* ¹ (15.4MPa)* ²	
	Compression σ_B^C	8.7 MPa	
Yield strength σ_y $= \sigma_B \times \alpha_{a2}$ (α_{a2} in Table 1)	Bending σ_y^B	17.2 MPa	14.2 MPa * ³
	Tension σ_y^T	9.5MPa (12.3MPa)* ²	7.8MPa (10.3MPa)*²
	Compression σ_y^C	7.6 MPa	5.8 MPa
Fatigue limit $\sigma_w = \sigma_B^T \times \alpha_f$ (α_f in Table 1)		2.5 MPa * ³ (3.2 MPa)*²	3.4 MPa (4.4 MPa)* ²

*¹ Static tensile strength σ_B^L in L- axis when the number of plates $N=7$ and plywood thickness $t_p = 15\text{mm}$ (see Table 4-5) which are specified as first- C-C grade plywood by JAS (AIJ 2003[21]; AIJ 2006[5])

*² However, as indicated in Table 4-5, since AIJ values*¹ may have some misprints, presumed correct values are indicated in the parentheses.

*³ **Bold number** denotes the values recommended by the authors

4.8 結言

本研究では、機械設計の観点から木質材料の破断強度と疲労強度の見積り方を日本建築学会(AIJ)と ASTM のデータから考察するとともに、耐久比 σ_w / σ_B に相当するもの（疲労限と静的強度の比）の算出方法を示した。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 木質材料の強度データの取り扱いにおいて、機械設計では理解困難な建築設計特有の専門用語が使われている。建築設計で最も重要な基準強度特性値 σ_F が、破断強度 σ_B に相当することを指摘した。また、基準許容応力度 σ_f が、疲労強度 σ_w に相当することを示した。これにより、木質材料の疲労耐久比 σ_w / σ_B を明らかにした。

(2) 応力ひずみ線図から、製材の強度は、繊維方向 > 放射方向 > 接線方向であり、繊維方向が圧倒的に強く、製材は異方性材料である。一方、構造用合板は、表 4-5 示すように、単板厚さが薄い 5.0mm, 7.5mm 厚さを除けば、L 方向と T '方向の基準許容応力度の強度比(T 'L)は 1 にほぼ等しく等方材とみ

なすことができる。すなわち、合板が原木の異方性を緩和し強度を向上させ得ることを明らかにした。

- (3) 日本建築学会と ASTM の木材強度の算出方法を比較して、その違いを明らかにした。表 4-6 に示すように、ASTM の算出方法では (a) Adjustment factor, (a1) Degradation Factor, (b) Strength ratio, (c) Seasoning adjustment, (e) Special factor があり、(a2) Safety factor, (d) Environmental coefficient がない。AIJ の算出方法では、(a1) Degradation Factor, (a2) Safety factor, (d) Environmental coefficient, があり、(a) Adjustment factor, (b) Strength ratio, (c) Seasoning adjustment, (e) Special factor がない。その結果、求めまる (f) Product of coefficients α_f (疲労耐久比は)、ASTM では、曲げの $\alpha_f = 0.34$, 引張の $\alpha_f = 0.21$, 圧縮の $\alpha_f = 0.43$ に対し、AIJ では、曲げの $\alpha_f = 0.25$, 引張の $\alpha_f = 0.29$, 圧縮の $\alpha_f = 0.29$ であることを示した。ここで、AIJ では、引張りと圧縮の疲労耐久比が同じであることを明らかにした。
- (4) 設計に必要な疲労耐久比は、表 4-6 に示す係数 (f) の積 α_f から求められる。ASTM と AIJ から得られた係数の積 α_f は、静的強度に対する疲労限度の比 σ_w / σ_B^B , σ_w / σ_B^T , または σ_w / σ_B^C と見なすことができる。曲げと引張りにおいては、AIJ の曲げ耐久比 σ_w / σ_B^B と引張耐久比 σ_w / σ_B^T を採用する方が安全である。圧縮においては、ASTM の圧縮耐久比 σ_w / σ_B^C を採用する方が安全である。
- (5) AIJ と ASTM のデータから木質材料の破断強度と疲労強度の見積り方を考察して、構造用合板 1 級、15 mm 材の破断強さ、降伏強さ、疲労限を明らかにし、表 4-11 に示した。構造用合板 1 級材の引張り強さと圧縮強さの相関関係が、引張り強さ $\sigma_B^T = 11.9\text{MPa} >$ 圧縮強さ $\sigma_B^C = 8.7\text{MPa}$ であることを示した。

付録 木材用語

表 A に木材に関する建築設計用語の和文と英文を示す。木材に関する建築設計用語は、和文および英文の両者において、強度に関する用語で機械設計用語と異なる表現をしていることと、更に、木材特有の用語が数多くある。ここでは、ASTMD245[12]、ASTMD2555[13]およびASTMを元に執筆されたティンバーメカニクス[10]等を元に、代表的な木材に関する建築設計用語の和文と英文を示す。

Table A. Architectural design terminology for wood

Japanese	English	Note
許容応力度	Allowable properties	[10], [12]
許容応力度	Allowable stress value	[12]
許容応力	Allowable stress	[10], [12]
応力度	Stress-grade	[10], [12]
構造等級許容応力度	Structural grades and related allowable properties	[10], [12]
弾性係数	Modulus of elasticity	[10], [12]
曲げ弾性係数	Modulus of elasticity in bending	[10], [12]
ヤング係数	Young's modulus	ヤング率, ヤング弾性率, 縦弾性係数とも, [5], [12]
引張り強度	Tensile strength	[12], [13]
木材の引張り強度	Tensile strength of lumber	[12]
縦引張り	Tension parallel to grain	曲げの 0.55 倍[10], [12]
縦引張り強度	Tensile strength parallel to grain	[10], [12]
縦引張り強度	Tension strength perpendicular to grain	[13]
縦横引張り強度	Tensile strength parallel and perpendicular to grain	[13]
縦圧縮	Compression parallel to grain	[10], [12]
縦圧縮強度	Compressive strength parallel to grain	[10], [12]
せん断	Horizontal shear	[10], [12]
せん断	Shear	[10], [12]
せん断強度	Horizontal shear strength	[10], [12]
せん断強度	shearing strength	[10], [13]
長期変形限度	long-time deformation limit	[12]
繰り返しの荷重	Repeated loads	[13]
破断係数	Modulus of Rupture	[13]
破断強さ	Crushing strength	[13]
縦破断強さ	crushing strength parallel to grain	[13]

Continued from Table A. Architectural design terminology for wood

Japanese	English	Note
安全率	Factor of safety	[12]
針葉樹	Softwood	[10], [12]
広葉樹	Hardwood	[10], [12]
製材	Lumber	[10], [12]
構造用材	Structural members	[12]
実大材	Timber	[5]
合板	Plywood	[13]
合板	Laminated wood	[13]
視覚的に等級づけられた製材品	Visually graded lumber	[10], [12]
柾目	The direction of the grain	[22]
グリーンランバー	Green lumber	材料, 乾燥前の製材したばかりの材木, [23]
無欠点木材	Clear wood	[10], [12]
無欠点木材の強度値	Clear wood strength values	[10], [12]
無欠点小試験体の基準強度値	Clear wood strength value	[10], [12]
無欠点の木材の強度	Clear wood properties	[10], [12]
無欠点小試験体	Clear wood specimens	[12]
無欠点小試験体と実大構造用材のテスト	Tests of small clear specimens and of full-sized structural members	[12]
標準強度試験	Standard strength test	[13]
欠点	Defect	[12]
欠陥	Defect	[12]
節	Knot	曲げに影響, [10]
断面欠損	Knot	節を穴と考える, [10], [12]
繊維傾斜	Slopes of grain	[10], [12]
材縁の節	Edge knot	[10], [12]
狭い面の節	Narrow face knot	[10], [12]
広い面の中央の節	Knot at edge of wide face	[10], [12]
いずれかの面の節	knot on any face	[10], [12]
割れ	Shakes	(樹木の) 割れ, [22]

Continued from Table A. Architectural design terminology for wood

Japanese	English	Note
割れ	Checks	〈木材などの〉ひび割れ, 割れ, 割れ目, [22]
割れ	End split	[12]
割れ	End check	[12]
割れの大きさ	Size of shake or check	[10], [12]
割れのサイズ	Check width	[12]
割れの長さ	Length of end split	[10], [12]
めり込み	Compression perpendicular grain	[10], [12]
めり込み (1mm 変形時)	Compression perpendicular to grain at 0.04 in. (1 mm) deformation	[10], [12]
めり込み (比例限度)	Compression perpendicular to grain for proportional limit stress	[10], [12]
変形	Deformation	[10], [12]
変動係数	A coefficient of variation	[22]
繊維飽和点	fiber saturation point	[12]
含水率	Seasoning Effects	[10], [12]
含水率	Moisture Content	[10], [12]
含水率による調整	Seasoning Adjustment	[10], [12]
変形	Deformation	[10], [12]
調整係数	Modification	[10], [12]
調整係数	Adjustment factors	[10], [12]
低減係数	Reduction factor	[10], [12]
荷重継続期間の調整分	Degradation factor	[10], [12]
安全率	Safety factor	[10], [12]
強度比	Strength ratio	[10], [12]
含水率による調整	Seasoning adjustment	[10], [12]
含水率	Seasoning effects	[10], [12]
含水率	Moisture content	[10], [12]
劣化影響係数	Environmental coefficient	[5], [12]

第4章参考文献

1. ケイ・プロダクツ(株), 引き戸用手摺, 引き戸装置, 特許出願 2010-102602, 公開番号 2011-231513.
2. ケイ・プロダクツ(株), 引き戸用手摺, 引き戸装置, 特許出願 2012-133492, 公開番号 2013-256808.
3. 斉藤金次郎, 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 村井克成, 王澤鋒, 李蘇瓊, 劉瀟, 田中洋征, 久保嘉孝: 高齢者・障害者の自立歩行を支援する手摺収納式引き戸装置の開発(第1報, 引き戸開口力のシミュレーション), 日本設計工学会誌, 52, 8 (2017), 503.
4. 斉藤金次郎, 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 村井克成, 王澤鋒, 李蘇瓊, 劉瀟, 田中洋征, 久保嘉孝: 高齢者・障害者の自立歩行を支援する手摺収納式引き戸装置の開発(第2報, 収納式引き戸の強度解析と実験的検討), 日本設計工学会誌, 54, 12 (2019), 843.
5. 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 丸善 (2006), 149.
6. 製材の日本農林規格, 平成 19 年 8 月 29 日農林水産省告示第 1083 号.
7. 沢田稔: 木材の強度特性に関する研究 主として, その木材梁への適用, 日本林業学会, 日本林學會誌, 41 (1959), 118.
8. 合板の日本農林規格, 平成 26 年 2 月 25 日農林水産省告示第 303 号.
9. 桑村仁: 合板の面内挙動における異方弾性と強さ, 日本建築学会構造系論文集, 75, 653 (2010), 1317.
10. 中村昇, 山崎真理子, 村田功二: ティンバーメカニクス, 木材の力学理論と応用, 海青社, (2015), 144.
11. 佐藤公紀, 岡田章, 宮里直也, 廣石秀造, 斎藤公男: 木造面格子壁の格子間隔が剛性および耐力に及ぼす影響に関する研究(その3)木材の区順強度が面格子壁の構造性能に及ぼす影響, 日本大学理工学部学術講演会論文集 (2013), 77.
12. ASTM D245 – 06. 2019.
13. ASTM D2555 –17a. 2017.
14. 日本建築学会: 木質構造限界状態設計指針(案)・同解説, 丸善 (2003), 155.
15. W. J. Kommers, U. S. Dept. FPL, No.1327 (1944) No.1327-A (1960).
16. 今山延洋・松本昴: 木材の疲れに関する研究(第1報), 木材学会誌, 16, 7 (1970), 319.

17. 安藤幸世, 山崎真理子, 渡辺純子, 佐々木康寿: 木材のねじり疲労特性, 木材学会誌, 51,2(2005), 98-103.
18. 満久崇麿, 佐々木光: 回転曲げ疲労強度について, 京都大学木材研究所報告 31(1963), 1-10.
19. 奥山剛, 伊藤孝子, ヌリ・ヌグロホ・マルスム: 繰り返し負荷に対する木材の力学的応答(第1報)引張及び圧縮疲労破壊, 木材学会誌, 30, 10(1984), 791-798.
20. 満久崇麿: 木質材料の疲労, 日本材料学会, 材料試験, 10, 98 (1961), 24.
21. 日本建築学会: 木質構造限界状態設計指針(案)・同解説, 丸善 (2003), 369.
22. 海野文男, 海野和子: ビジネス技術実用英語大辞典 V6, 合同会社プロジェクトポトス, (2018).
23. マグローヒル科学技術用語大辞典編集委員会: マグローヒル科学技術用語大辞典—第3版—, 日刊工業新聞社, (1996).

第 5 章 収納式引き戸の応力解析と木質材料の強度特性に基づく強度解析

5.1 緒 言

介護が必要とされる高齢者、障がい者いわゆる「健康弱者」用の住宅や介護施設、病院等においては、介護者なしでもつかまり歩きができるように、廊下全長にわたり手摺が装着されている。健康弱者の自力歩行が可能な時期に、歩行機能の減退防止の対策がとられた場合、対象者の歩行機能を維持し、回復させることができる[1, 2, 3]。しかし、部屋への出入口に設置される引戸やドアが廊下の途中にある場合、通常の手摺は装着することができず、そのため、手摺がなく歩けない部分ができてしまう。自立生活をサポートするには、手摺を途切れることなく連続して装着する必要がある。この観点から本研究では、20年の長期使用に耐える、自立歩行を支援する手摺収納式引き戸[4~7]の開発を目標とする。

著者らは先に、手摺を有する引き戸(ドアと呼称することもある)の、開口力をシミュレーションする理論式を求め、それをを用いて、最大開口力を実験の13%以内でシミュレーションでき、必要に応じてさらに小さくできることを示した[8]。残された課題は、引き戸が繰返しの使用に耐えて、十分な安全性を有することを確認することであり、このことは身体能力が十分でない使用者の立場に立てば重要な課題である。

そこで本研究では、図 5-1 に示すような手摺を有する試作品引き戸を対象として、手摺棒取付金具に作用する支持荷重を繰返し負荷させた疲労試験で、繰返し使用条件下の耐久性に対する安全性を実証する。合わせて、構造上の最弱部と想定される手摺棒取付金具周辺部の引き戸に生じる応力を有限要素法 FEM 解析によって、強度評価を行った。

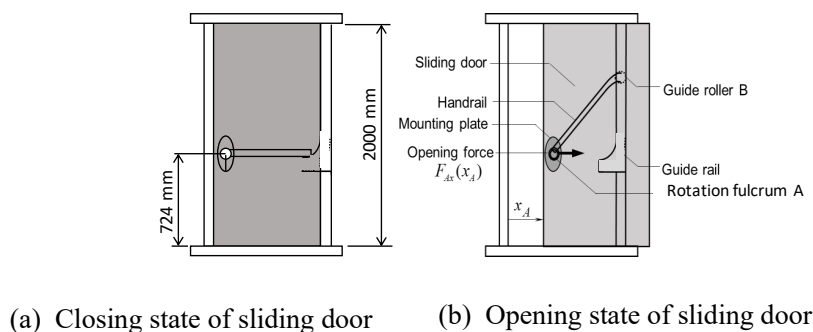


Fig. 5-1 Structure of the sliding door

5.2 試作品を用いた引き戸開口力の実測とシミュレーション

5.2.1 引き戸装置の構造

図 5-1(b)に示すように手摺収納式引き戸装置は、引き戸、手摺棒取付金具、収納式手摺、その手摺端部の回転ローラー、ガイドレールで構成されている。図 5-1(a)に示す引き戸を閉じた状態で、収納式手摺が手摺としての機能を果たす。引き戸を開ける動きで収納式手摺は取付金具の回転支点 A を軸にして、手摺端部の回転ローラー B がガイドレールスタンド内部の転走面を上方へ移動する。引き戸を閉じる動きで収納式手摺がガイドレール内部の転走面を伝い、下方へ移動する。図 5-1(a)に引き戸の代表寸法を示す。

5.2.2 引き戸開口力の実測とシミュレーション

図 5-2 に示すように、バネばかりを使って、試作引き戸開口力の挙動 $F_{Ax}(x_A)$ を測定した。測定には取付金具と同一高さの水平板上に設置された、摩擦を無視できる台上にバネばかりを固定し、バネの一端を取付金具側に固定し、他端のバネに固定されたひもを 15 mm/s の速さで引っ張る方法を用いた。図 5-3 に測定結果を示す。図中に示すシミュレーション解析は、力のつり合い式を用いた理論値に基づくものである。実験より得た結果をつり合い式で導き出した結果と比較すると、実験値と理論値の最大値はそれぞれ 22.4 N と 19.5 N であり、13%以内で一致することが確認できた。これらの結果は、著者らが 3 章で報告している通りである [8]。

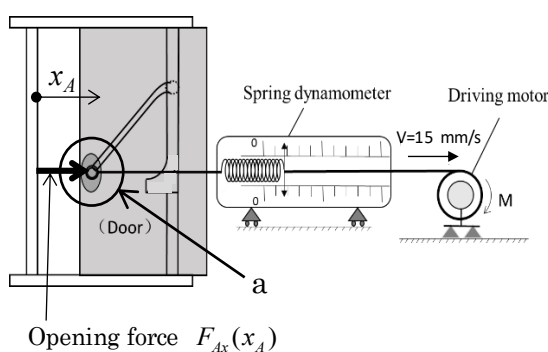


Fig. 5-2 How to measure sliding force $F_{Ax}(x_A)$

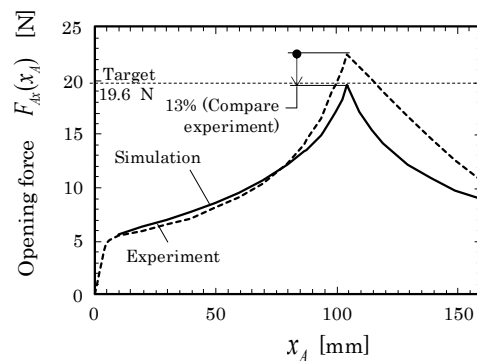


Fig. 5-3 Sliding force $F_{Ax}(x_A)$ obtained theoretically and experimentally in Fig. 5-1

5.3 引き戸木材部の強度解析

本章では、図 5-1 の引き戸の木材部を対象にして取付金具周辺の強度解析と考察を述べる。付帯する取付金具等の強度設計については、JIS 規格[9, 10]に準じて行っており、詳細には触れない。

5.3.1 木材の機械的性質と応力解析方法

表 5-1 に FEM 解析において必要な引き戸材と金具の機械的性質を示す。表 5-1 の合板製ドア材は、厚さ 15 mm の芯材を 2 枚接着し、その表裏面に厚さ 2mm のスギ材の化粧板を被覆してドア全体に用いられる。この合板ドアの全厚みは 35 mm であり、接着剤厚さを含む。合板ドアの強度は、実質的には芯材の強度とみなすことができる。従って芯材に使用した「合板の日本農林規格[11]」の構造用合板 1 級、板厚 15 mm 材 (C-C 等級材、スギ材) に与えられるものを使用するが、規格は許容応力度という強度を示しているのみで強度検討に必要な破断強度、降伏強度、疲労強度が示されていない。そこで、本論文では、4 章で AIJ と ASTM 規格から導いた表 5-1 に示す引き戸木材の破断強度 σ_B と降伏応力 σ_y および疲労強度 σ_w を使って強度評価を行う。ここで、合板の基準強度は、安全を見て、応力値の低い板の繊維に平行方向の値[9]を採用する。また、4 章で合板の性格上強さの方向性は無いことを明らかにしている。縦弾性係数 E は、合板の日本農林規格[11]に基づいて引用する。ポアソン比 ν は、ラワン合板の板目直角方向の値を用いる[15~18]。なお、スギ材の化粧板は、強度検討に加えない。

解析対象として、稼働中の損傷が最も高いと想定される手摺棒取付金具の周辺部に注目する。図 5-4 に解析に用いる取付金具がドアに固定されたモデルを示す。取付金具の回転支点部には、二つの力が作用する。すなわち、①固定用ボルトによる締付力(図 5-4(b))と②取手に作用する支持荷重である。①固定用ボルトの締付力は一定荷重であり、②支持荷重は変動負荷であるので、これらを考慮した強度評価が必要である。文献[19]より、支持荷重の最大値は、500 N と見積もられ、ここではこの値を用いる。この支持荷重 500 N は、動的な効果も考慮したものである。

図 5-4(b)の形状は、JISA1541-1[9]の木製ドア用ハンドルのボルト取付に用いるものを参考としている。図 5-4(b)の各部寸法は、強度アップを目的にサイズアップした寸法形状である。また、ボルト径も通常よりサイズアップした M6 とし、取付本数を 2 倍の 4 本としている。金具外形は、ドアへの取付位置の

スペース制限と強度を考慮して、だ円形にする。ここで用いた金具の強度は、JISA1541-1[9]およびJISA1513[10]に規定された部品取付部の強さ試験の判定基準を満たしている。後述するように(5.4.1, 5.4.3 節), 手摺棒端部のローラー及びビールと, 取付金具については, 実験により問題無いことを確認している。

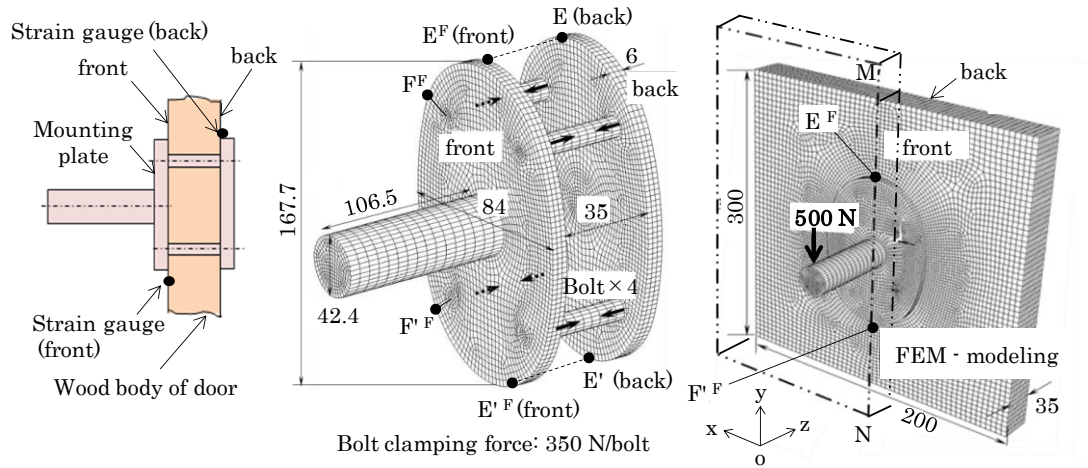
金具をボルトで固定する際, ボルト単独で板厚方向に締付ける座面下の木材に加わる圧縮応力が, 木材の降伏強さの 1/3(安全率 3)の値となるように, ボルトの締付力を 350 N に設定した。

ドア全体の安全性を確認するために, 金具を中心に 200 mm×300 mm×35 mm の木材部分を解析対象とし, さらに対称性を利用してその 1/2 を解析モデルとする(図 5-4(c))。モデル全体の要素数は 6.2×10^4 である。解析コードには市販の ANSYS WORKBENCH16.2 を使用し, 弾性接触を考慮した非線形解析を行う。解析に先立って, 取付金具周辺のドアのひずみを表面と裏面でゲージにより測定する。その詳細は, 5.4.2 節および 5.4.3 節で述べる。測定により, ひずみ振幅が大きかった裏面に注目して以下に解析結果を示す。

Table 5-1 Plywood material properties estimated from AIJ and ASTM used for FEM analysis

Items		Plywood for door	
		ASTM	AIJ
Elastic modulus	E	3.5 GPa	
Poisson's ratio	ν	0.4	
Ultimate strength σ_B provided by AIJ*	Bending σ_B^B	21.6 MPa	
	Tension σ_B^T	11.9 MPa	
	Compression σ_B^C	8.7 MPa	
Yield strength σ_y $= \sigma_B \times \alpha_{a2}$ (α_{a2} in Table 1)	Bending σ_y^B	17.2MPa	14.2MPa*
	Tension σ_y^T	9.5 MPa	7.8 MPa*
	Compression σ_y^C	7.6MPa	5.8 MPa*
Fatigue limit $\sigma_w = \sigma_B \times \alpha_f$ (α_f in Table 1)		2.5MPa*	3.4MPa

***Bold number** denotes the values recommended by the authors



(a) Sectional view for mounting plate

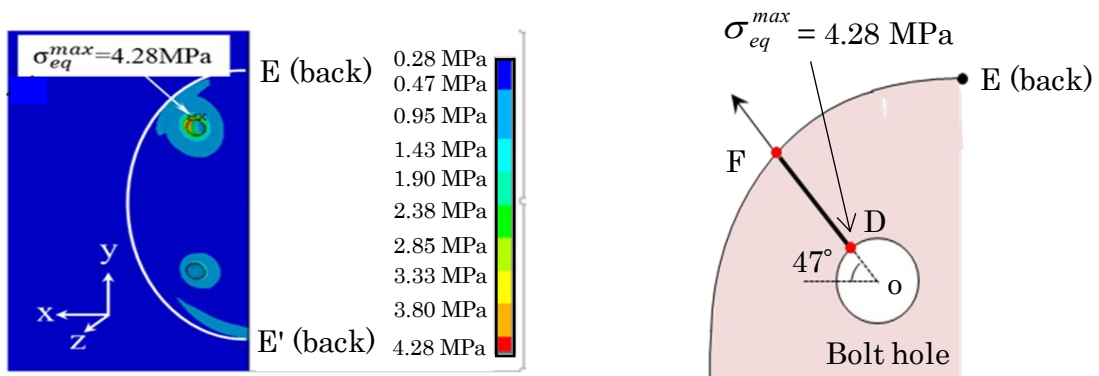
(b) Mounting plate clamped by bolts

(c) Door with mounting plate subjected to human weight

Fig. 5-4 FEM analysis model for mounting plate and door (Unit: mm)

5.3.2 最大応力に対する強度評価

最初に、最大応力によって生じる一発破壊を想定して考察する。図 5-5 に最も破壊の危険性が高いボルト取付金具固定部のドア板裏面の FEM 解析結果に基づく相当応力を示す。図 5-5(a)は、図 5-4(b), (c)に示すように取付金具をボルトで締結した後、支持荷重 500 N を作用させた時のドアの裏面の応力分布を表面側から透視して見たものである。



(a) Stress distribution

(b) Position of maximum stress

Fig. 5-5 Equivalent stress under the action of bolt clamping and human weight 500N on the back side in Fig.5- 4

図 5-5 (a), (b)に示すように、最大相当応力はボルト孔周辺の点 D に生じる。そのため、図 5-6 は、孔周縁の点 D を起点にした線 DF(図 5-5(b))に沿って生じる応力分布を示している。ここでは、板材の疲労強度評価に用いることができる主応力 σ_1 , σ_2 , $\sigma_3 = \sigma_z$ を示す。図 5-6(a)に示すボルト締付状態における応力は、支持荷重 500 N が加わることによって図 5-6(b)に変化する。図 5-6(b)において、最大圧縮主応力は裏面上側のボルト孔周辺に生じる $\sigma_3 = -3.95$ MPa である。一方、最大引張主応力は $\sigma_1 = 0.85$ MPa である。最大圧縮応力および最大引張応力は点 D に作用する。

表 5-2 は、まず、孔周辺の最大引張応力 $\sigma_1 = 0.85$ MPa, 最大圧縮応力 $\sigma_3 = -3.95$ MPa に注目して、それらが表 5-1 の引張降伏強さ σ_y^T , 圧縮降伏強さ σ_y^C に対してどの程度安全であるかを安全率 $= \sigma_y^T / \sigma_{max}^T$ と安全率 $= \sigma_y^C / \sigma_{max}^C$ で定義してまとめたものである。表 5-2 より、引張応力 σ_{max}^T に対する引張降伏強さ σ_y^T の安全率 $\sigma_y^T / \sigma_{max}^T = 9.1$ で十分な安全性を有するが、圧縮応力 σ_{max}^C に対する圧縮降伏強さ σ_y^C の安全率は $\sigma_y^C / \sigma_{max}^C = 1.4$ で引張降伏強さの安全率 9.1 に比べて余裕が小さいことが懸念される。しかし、降伏域は座面孔縁直下角部の応力集中部に限定されており、板厚全域に及ぶものではない。さらに、圧縮強さ σ_B^C に対しての安全率は $\sigma_B^C / \sigma_{max}^C = (8.7\text{MPa}/3.95\text{MPa}) = 2.2$ であり十分安全である。このことを踏まえ、ボルト孔周辺の欠け等の発生を懸念して、5.4 節で実験的にも確認する。

図 5-7 は、取付金具周辺の損傷の可能性に注目している。ここでは、ドア板裏面に生じる応力分布を示している。図 5-7(b)に示すボルト締付状態における応力は、支持荷重 500 N が加わり図 5-7(c)に変化する。図 5-7(b)に、ボルト孔近くの点 F, 点 F' の周辺にボルト締め付けに伴う板厚方向に圧縮応力が生じている。図 5-7(c)に示すように、取付金具に支持荷重 500 N が加わると、点 F の圧縮応力は $\sigma_z = -0.25$ MPa から $\sigma_z = -0.76$ MPa に増大する。また点 E'(back)近傍に最大引張応力 $\sigma_y = 0.95$ MPa が生じる。この結果に基づき、図 5-4(b)に示す最大応力が生じる引き戸裏面金具頭部点 E (Back)と、表面で最大応力が生じる金具底部点 E' (front)に注目する。具体的には、点 E' (front), 点 E (back)の金具縁から 2 mm 離れた点(図 5-7(a)参照)にひずみゲージを貼り付けた。そして支持荷重の繰返しに伴うひずみの変化をこれらの 2 点でモニタリングする。その結果を 5.4 項で述べる。

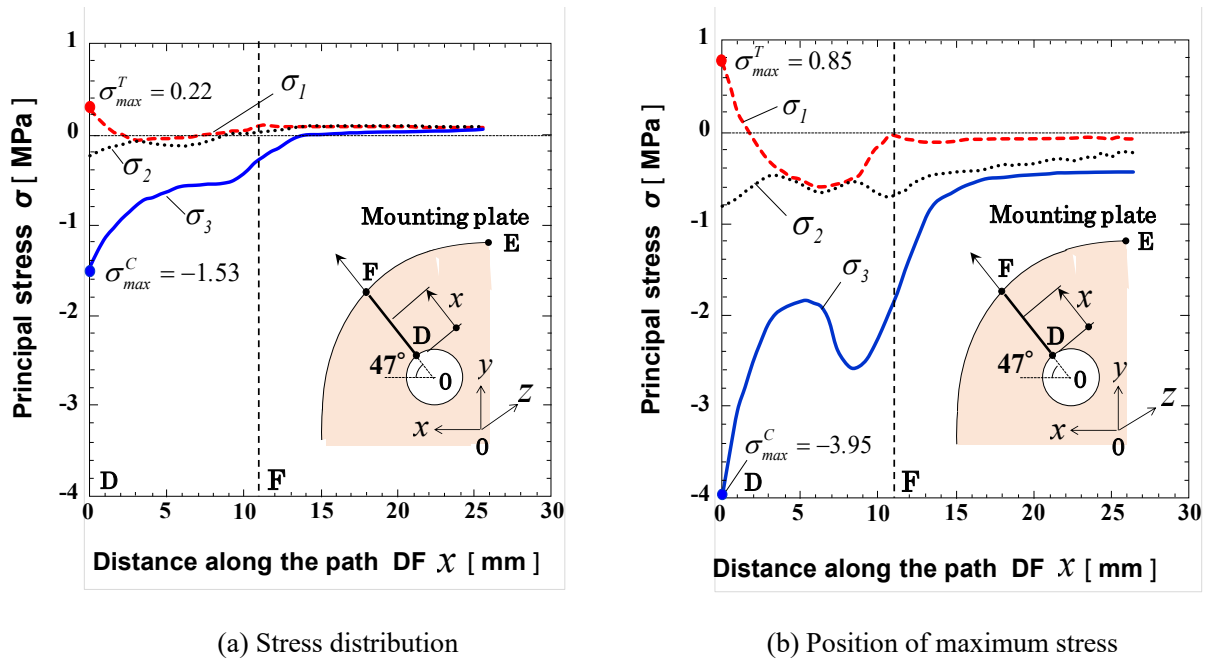
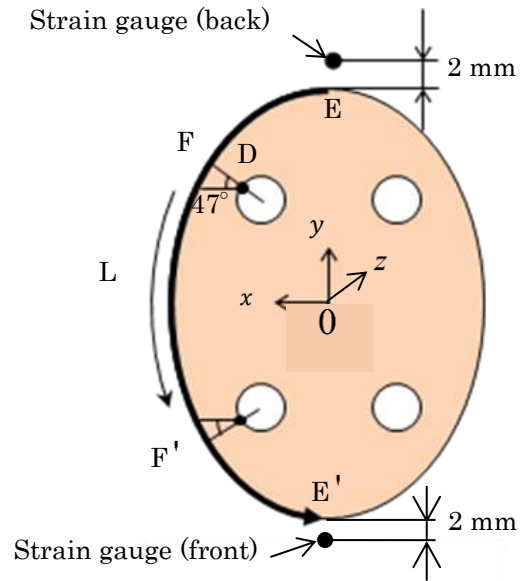


Fig. 5-6 Principal stress distributions along path DF (Back side)

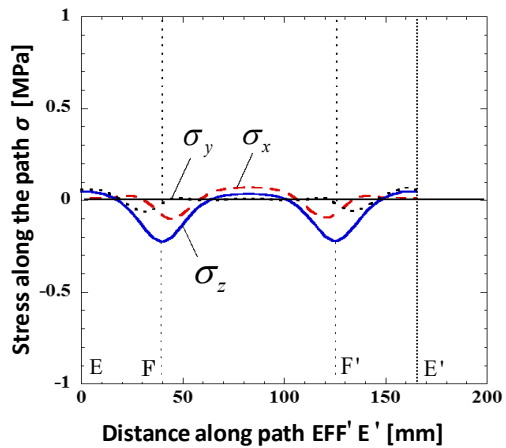
Table 5-2 Maximum stress, strength and safety factor at point D in Fig. 5-5(b)

Maximum stress in Figure 6(b)	Yield strength in Table 1	Safety factor
Maximum tensile stress $\sigma_{max}^T = 0.85 \text{ MPa}$	$\sigma_y^T = 7.8 \text{ Mpa (AIJ)}$	$\sigma_y^T / \sigma_{max}^T = 9.1$
Maximum compressive stress $\sigma_{max}^C = -3.95 \text{ MPa}$	$\sigma_y^C = 5.8 \text{ MPa (AIJ)}$	$\sigma_y^C / \sigma_{max}^C = 1.4$

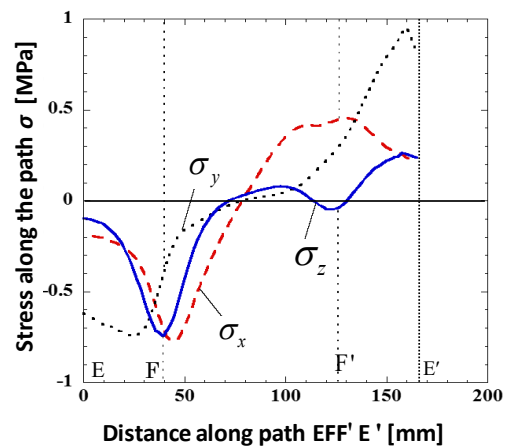


$L_{EF}=39.3 \text{ mm}$ $L_{EE'}=165.2 \text{ mm}$

(a) Path EFF'E' along the mounting plate edge



(b) Stress due to bolt clamping



(c) Stress due to bolt clamping and human weight

Fig. 5-7 Stress distributions along path EFF'E' on the back side in Fig. 5-4(c)

5.3.3 疲労に対する強度評価

表 5-3 は、通常の金属疲労の考え方に基づいて応力振幅と平均応力をまとめたものである。金属疲労では、応力振幅と平均応力から耐久線図を用いて疲労強度を評価することが通常行われており[20]、き裂の発生には応力振幅が重要であり、き裂の伝播には平均応力が重要であることが知られている。この表では、図 5-6(a)と図 5-6(b)の比較から、最大応力振幅が生じるボルト孔縁の危険部位点 D に注目して

いる。また、図 5-7(a)と図 5-7(b)の比較から、金具縁の危険部位点 E および点 F にも注目してまとめた。図 5-8 は、表 5-3 の結果を耐久限度線図にプロットしたものである。ここでは、強さに異方性は無いものとして引張降伏強さ σ_y^T と両振疲労限度 σ_w を結ぶ線で求まる耐久限界を示した。なお、これは引張さを用いる修正グッドマン線図に対して、降伏強さを用いるゾーダブルグ線図に相当する耐久限度線図である。図 5-8 に示す 5 点は、図 5-6(a), (b)の主応力の差並びに図 5-7(a), (b)の応力の差を基準にして近似的に求めた。これらの 5 点は、いずれも耐久限度線の範囲内にあり、強度的に安全である。

Table 5-3 Average stress σ_m and stress amplitude σ_a along the mounting plate edge in Fig. 5-7(a)

Position	Stress component	σ_m [MPa]	σ_a [MPa]	Safety factor (From Fig.5-8)
D in Fig. 6(a), (b)	σ_l	0.54	0.32	5.1
E in Fig. 7(b), (c)	σ_y	-0.28	0.34	10.0
F in Fig. 7(b), (c)	σ_z	-0.49	0.26	24.5
F' in Fig. 7(b), (c)	σ_z	-0.15	0.1	48.2
E' in Fig. 7(b), (c)	σ_y	0.50	0.45	4.4

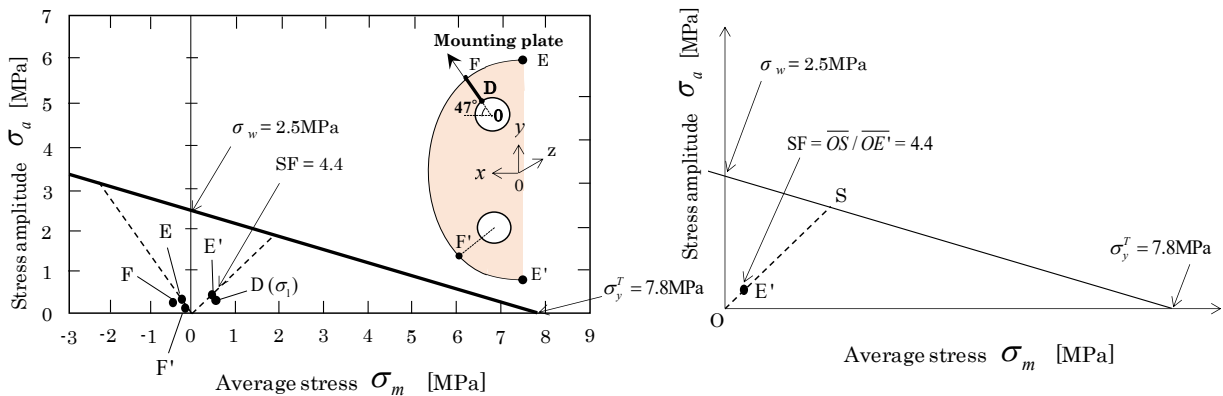


Fig. 5-8 Endurance limit diagram

5.4 引き戸の耐久性に関する実験的検討

前節より、最大引張応力は、表 5-2 より、十分な安全性を有するが、圧縮応力に対しては、ボルト孔周辺の欠け等の発生の懸念がある。そこで、本節では試作ドアを用いて、ドアの繰り返し開閉試験と、取付金具への繰り返し負荷試験を行う。開閉試験では、引き戸のレールやローラー等の構造部の損傷を確認する。負荷試験ではドア表面と裏面に生じるひずみの繰り返し荷重に対する変化を測定し、金具周辺に発生するへこみやドア面の変形を測定する。なお、金具周辺部の繰り返し荷重による損傷は、ひずみの増加によって評価できることを予備実験で確認した。

5.4.1 繰り返し開閉試験の方法および試験結果

引き戸全閉状態から全開状態までの 1 往復を 1 回として、 2×10^5 回繰り返し、引き戸のレールやローラー等の構造部の損傷を目視および染色探傷確認する。併せてドアの反りや変形も測定する。その開閉試験を 2×10^5 回繰り返した結果、①手摺の変形異常なし、②ガイドレールの摩耗変形異常なし、③ローラー摩耗およびローラー軸の変形異常なし、試験作動中の異音はなかった。④ドアの反りは 0.8 mm 以下で、引き戸開閉に使用上の支障がなく、規定(JISA1513 建具の性能試験方法通則[10]および JISA1530 建具の開閉繰り返し試験方法[21])を満足した。また、ドア下部のころの変形および作動中の異音はなかった。

5.4.2 繰り返し荷重試験の方法

繰り返し使用時に最大圧縮応力によってドア表面と裏面に生じるひずみの変化をモニタリングする。そして、繰り返し回数に伴う変化を調べる。疲労による大きな損傷が生じれば、対応するひずみが変わると考えられる。この目的のため、前節の解析結果に基づき、図 5-4(a)に示す点 E(back)、点 E^F(front)の金具縁から 2 mm 離れた点にひずみゲージを貼り付けた(図 5-7(a)参照)。

取付金具の支点軸先端部(図 5-4 参照、支点軸と手摺棒中心軸との交点)に支持荷重 500 N をエアシリンダで、片振り(応力比 $R = 0$)で垂直に繰り返し加える。そして設計目標 2×10^5 回の繰り返しにより取付金具装着部の板材が耐えるかどうかを調べる。これは、JISA4702に規定された引き戸の耐用回数 1×10^5 回[22]、ならびに JISA4706 に規定されるアルミ製サッシの耐用回数 3×10^4 回[23]の 2 倍以上の繰返数である。ここで用いるひずみゲージは、特殊プラスチックをベースに用いた箔ゲージを使用する。これは、弾性係

数の低い材料に適したグリッド形状により測定対象物への拘束効果を小さくした木材用のひずみゲージである。

図 5-9(a)に荷重を加えるエアシリンダ装置を示す。図 5-9(a)では、取付金具に掛かる荷重が最大となるように支点軸先端部に直接エアシリンダの荷重を加えた。図 5-9(b)にエアシリンダのエア回路図を示す。用いるエアシリンダの内径 $\phi 40$ mm、ストローク 140 mm であり、エアシリンダの先端と取付金具の手摺位置を直径 $\phi 6$ mm のワイヤロープで繋ぎ、エアシリンダの引き側作動で取付金具に荷重を加える。エアシリンダで荷重 500 N が加わるように減圧弁でコンプレッサエア圧力を 0.47 MPa に設定した。シリンダ引圧作動の切り替えは、電磁弁をタイマ制御で行い、本実験では、繰返し速度を 3.8 s/回に設定した。荷重による引き戸面のひずみは、引き戸表裏の取付金具上下端近傍にひずみゲージを貼付け測定した。繰返し回数は、機械式カウンタで測定した。その詳細は、図 5-9(b)の通りである。

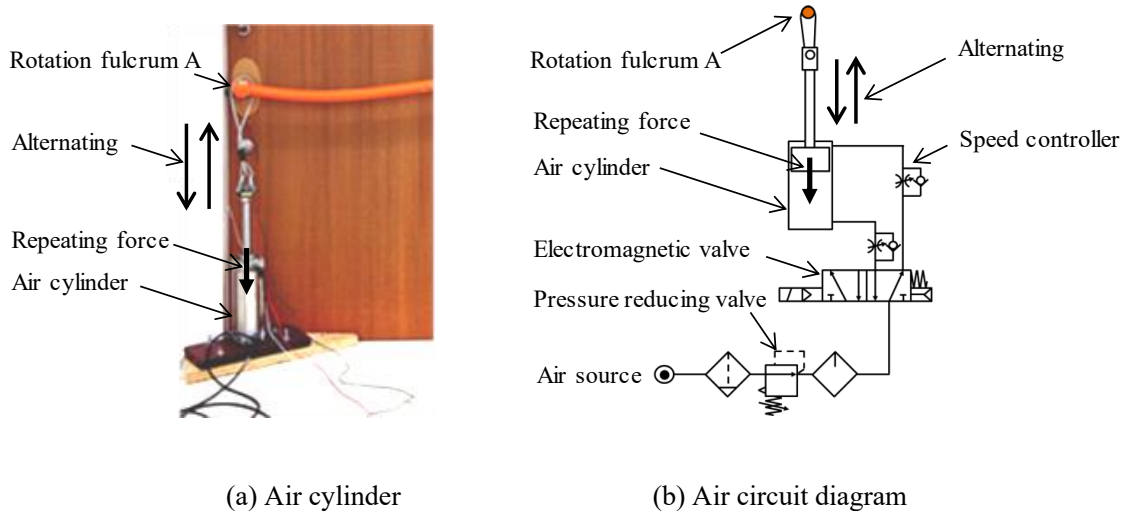


Fig. 5-9 Fatigue experimental equipment

5.4.3 繰返し荷重試験結果

図 5-10 に実体ドア疲労試験の結果として、金具取付下部の板材表面のひずみ $\epsilon_y(E \cdot F(\text{front}))$ と裏面のひずみ $\epsilon_y(E(\text{back}))$ を示す。表面と裏面の両者のひずみとも、繰返し回数とともに大きな変化は認められず、大きな損傷は生じていない。なお表面と裏面のひずみの違いには、ひずみゲージ貼り付け時の接着材の施工、板面粗度、および木材繊維の不均一性等の影響が含まれている。

実験終了後、取付金具下部板材のボルト孔周辺部におけるき裂有無を肉眼で調べた。ボルト孔開け加工時に孔周辺に生じた 1mm ほどの微細な欠けは見られるが、その部分から肉眼で検出できるようなき裂の発生はなかった。さらに、図 5-11(a)に示すように、表面形状の変化を見るために、金具取付部を中心に、引き戸の表面プロファイルをダイヤルゲージで測定した。まず、定盤上に引き戸裏面を上側にして水平に置き固定した。引き戸の縦方向端面と平行にゲージプレートを設置して、ゲージプレートに沿ってダイヤルゲージブロックを移動させ、取付金具の取付部を含むドア表面プロファイルをデジタルダイヤルゲージで測定した。図 5-11(b)に測定結果を示す。金具取付位置の上下端の 2 点に-0.05 mm と-0.07 mm の圧痕が認められるが、強度的に影響するものではない。また、ボルト孔周辺の、欠け落ち等が懸念されたが、問題となる傷は認められなかった。なお、繰り返し荷重試験によるドア面の反りは、最大 0.8 mm であった。試験終了後の取付金具において、軸等の変形はなく、開閉作動の支障もなかった。なお、ドアが木製であるので、経年の乾燥による収縮に伴う緩みやガタツキが生じる恐れがある。対策として、十分乾燥した木材を使用することや、収縮に伴う再締め等の管理が必要であることは言うまでも無い。

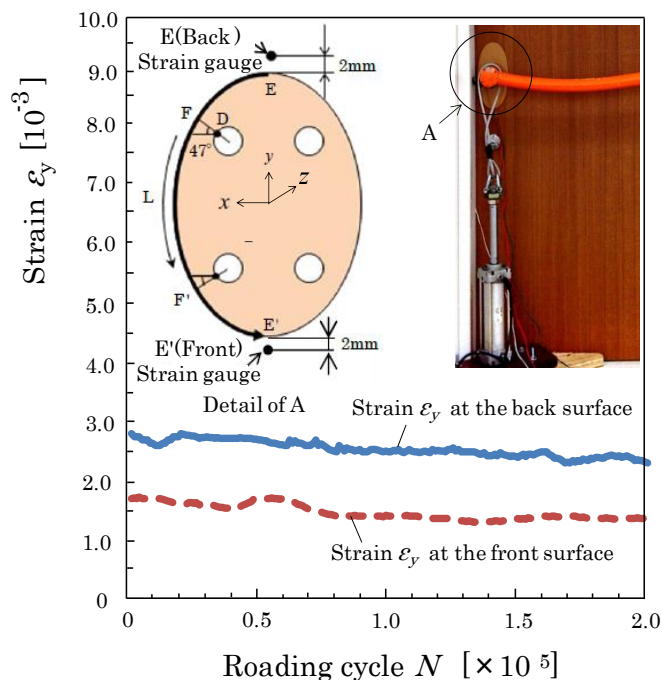


Fig. 5-10 Strain versus roading cycle

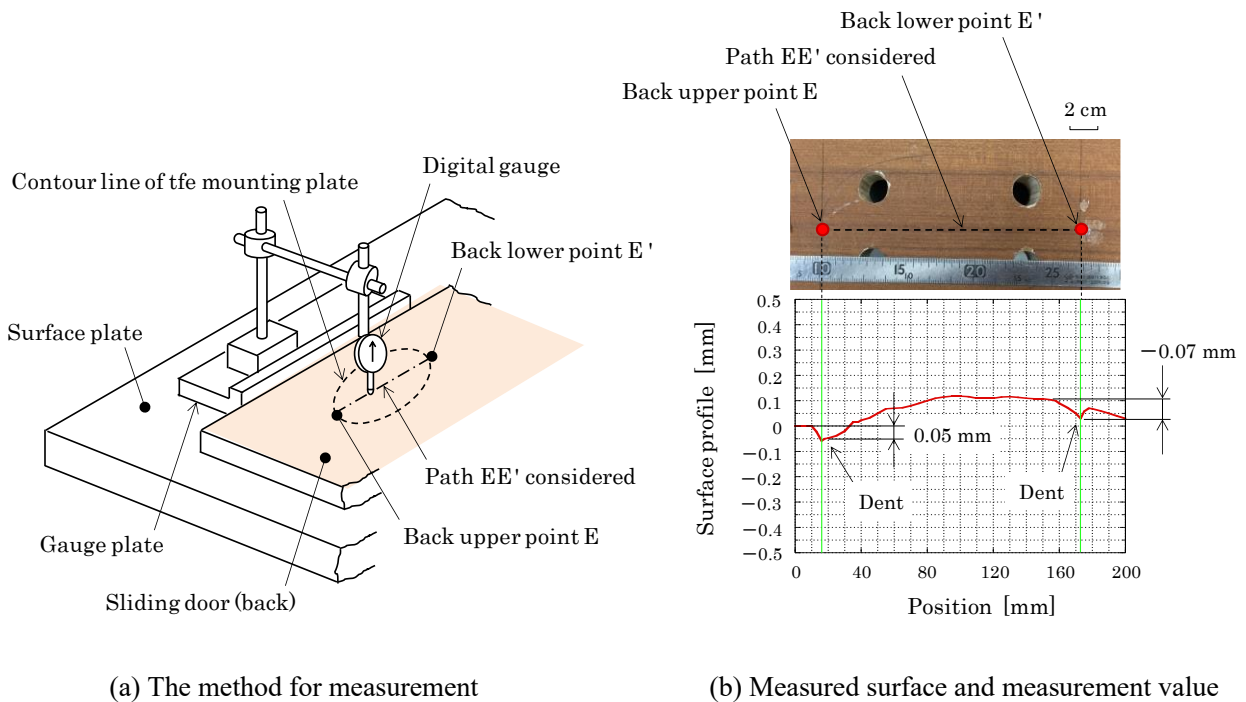


Fig. 5-11 Measuring strain after repeated loading

5.5 結 言

本研究では、図 5-1 に示すような健康弱者の自立歩行を支援する手摺収納式引き戸を対象として、最も危険であると考えられる手摺棒取付金具周辺での引き戸の安全性を評価した。具体的には、その部分を対象に FEM 解析を行うとともに、試作ドアによる実体疲労実験を行った。これらにより得られた結論は、以下の通りである。

1. 前章の見積法により求めた引張降伏応力と、引き戸に固定させる手摺棒取付金具周辺を対象に生じる最大引張応力を比較した。その結果、手摺棒取付金具の周囲に発生する最大引張応力 σ_{max}^T は、引張降伏応力 $\sigma_y^T = 7.1 \text{ MPa}$ よりも低いことがわかった ($\sigma_{max}^T < \sigma_y^T$)。安全率 $\sigma_y^T / \sigma_{max}^T = 8.3$ (最大引張応力 σ_{max}^T に対する引張降伏強度 σ_y^T) であり、十分安全であることが確認できた。
2. 前章の見積法により求めた圧縮降伏応力と、引き戸に固定させる手摺棒取付金具周辺を対象に生じる最大圧縮応力を比較した。その結果、手摺棒取付金具の周囲に発生する最大圧縮応力 σ_{max}^C は、圧縮降伏応力 $\sigma_y^C = 5.2 \text{ MPa}$ よりも低いことがわかった ($\sigma_{max}^C < \sigma_y^C$)。安全率 $\sigma_y^C / \sigma_{max}^C = 1.3$ (最大圧縮応力 σ_{max}^C に対する圧縮降伏強度 σ_y^C) であり、十分安全であることが確認できた。

3. 有限要素法 FEM 解析によって、引き戸に固定させる手摺棒取付金具周辺を対象に最大応力振幅と平均応力を求め、耐久限度線図上で考察した。それらの結果は、引張降伏強さ σ_y^T と両振疲労限度 σ_w を結ぶ耐久限度線の範囲内にあり、相対的安全率 $SF = 4.1$ であり強度的に十分安全であることを確認した。また、降伏域は座面孔縁直下角部の応力集中部に限定されており、肉眼で検出できるような傷は見つからなかった。
4. 試作された引き戸を用いて、取付金具に 500 N の負荷を JIS 規格[22, 23]で規定された以上の繰返し数 2×10^5 回で実体疲労試験を行った結果、使用上問題となる損傷が生じることなく、十分な耐用性が確認できた。
5. 試作された引き戸を用いて、主として取付金具とそれに付随する構造の安全性を繰り返し開閉試験により調べた結果、いずれも、使用上問題となる損傷が生じることなく、JISA1513 建具の性能試験方法 通則[10]の規定を満たす結果が得られた。
6. 上記 1~4 の結論から、試作品の引き戸は実験的及び解析的に安全であることが確認された。

第 5 章参考文献

1. 平成 18 年度厚生労働省老人保健健康増進等事業報告書、地域在宅高齢者に対する歩行支援プログラムの健康増進効果に関する研究、29.
2. 金憲経, 吉田英世, 鈴木隆雄, 石崎達郎：高齢者の転倒関連恐怖感と身体機能—転倒外来受診者について—, 日本老年医学会雑誌, 38 (2001),805.
3. WHO Global Report on Falls Prevention in Older Age : WHO Library Cataloguing-in-Publication Data ISBN 978 92 4 156353 6 (NLM classification:WA 288),20.
4. ケイ・プロダクツ(株), 引き戸用手摺, 引き戸装置, 特許出願 2010-102602, 公開番号 2011-231513.
5. ケイ・プロダクツ(株), 引き戸用手摺, 引き戸装置, 特許出願 2012-133492, 公開番号 2013-256808.
6. ケイ・プロダクツ(株), 引き戸用手摺, 引き戸装置, 特許出願 2016-035259, 公開番号 2017-150260.
7. ケイ・プロダクツ(株), 引き戸用手摺の取付構造, 引き戸装置, 特許出願 2016-035260, 公開番号 2017-150261.

8. 斉藤金次郎, 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 村井克成, 王澤鋒, 李蘇瓊, 劉瀟, 田中洋征, 久保嘉孝: 高齢者・障害者の自立歩行を支援する手摺収納式引き戸装置の開発(第1報, 引き戸開口力のシミュレーション), 日本設計工学会誌, 52,8 (2017),503.
9. JISA1541-1, 建築金物—錠—第1部: 試験方法, 日本規格協会, 2016.
10. JISA1513, 建具の性能試験方法通則, 日本規格協会, 1996.
11. 合板の日本農林規格, 平成26年2月25日農林水産省告示第303号.
12. 日本建築学会木質構造設計規準・同解説, (2006),149.
13. 伊吹幸彦, 佐々木光, 河本実, 満久崇麿: 集成材の耐久性に関する研究 集成材の平面曲げ疲労強度について, 社団法人日本材料学会, 材料試験, 11 (1962),103.
14. 伊吹幸彦, 佐々木光, 河本実, 満久崇麿: 平面曲げ疲労強度について, 京都大学木材研究所報告, 39 (1963),11.
15. 高見勇: 合板の強さについて(I), 独立行政法人森林総合研究所, 林業試験場研究報告 208 (1968),80.
16. 沢田稔: 木材の強度特性に関する研究 主として, その木材梁への適用, 日本林業学会, 日本林學會誌,41 (1959),139.
17. 綿貫幸宏, 上田恒司, 奥山裕美: 木質平面材料の弾性定数に関する研究 第2報異種構成合板の弾性定数, 北海道大学農学部演習林研究報告, 29 (1972),347.
18. 福原敬彦: 木材の横圧縮変形に関する研究, 東京大学農学部演習林報告, 61(1965),103.
19. 加藤正男, 八藤後猛, 野村歡, 布田健, 直井英雄: 動作・行為から見た手すりの分類および手すりにかかる人の転倒時荷重の計測—住居内壁付け手すり取付強度の定量的評価法に関する実験研究(1)—, 日本建築学会計画系論文集, 584 (2004),27.
20. 石橋正: 金属の疲労と破壊の防止, 養賢堂, 11(1969),1.
21. JISA1530, 建具の開閉繰り返し試験方法, 日本規格協会, 2014.
22. JISA4702, ドアセット, 日本規格協会, 2000.
23. JISA4706, サッシ, 日本規格協会, 2000.

第6章 結論

日本は、少子高齢化社会を迎え、何らかの介護を必要とする高齢者が増加傾向にある。高齢者が加齢に伴い体力が減衰していく段階で、まだ幾分でも自力歩行が可能な時期に、歩行機能の減退防止の対策を取ることができれば、歩行機能を維持・回復させることができる。介護が必要とされる高齢者、障害がい者、いわゆる「健康弱者」用の住宅や介護施設、病院等においては、介護者なしでもつかまり歩きができるように、廊下全長にわたり手摺が装着されている。しかし、部屋への出入口に設置される引き戸やドアが廊下の途中に引き戸がある場合、引き戸の合わせる面に手摺を装着すると引き戸の開閉ができなくなるため、通常の手摺は装着することができない。そのため、手摺がなく歩けない部分が出てしまい、トイレや、浴室に一人で行くことに困難が生じ、歩行機能の低下が進み運動機能の低下から、要介護状態への進行が問題となっている。

そこで本論文では、自立生活をできるようにするために、手摺を途切れることなく連続して装着するために、引き戸の合わせ面に取り付けることの出来る自立歩行を支援する手摺収納式引き戸の開発に努めた。得られた結論はすでに各章の終わりに示したが、それらを要約すると次のようになる。

(1) 第2章：本開発品を設計するにあたり、建築基準法および文献調査により、①手摺の設置高さ、車椅子が通行できる②引き戸開口寸法と③手摺の納まり寸法および④手摺棒の直径寸法を、人間工学の観点から高齢者が使いやすい設計条件を設定した。また、手摺の受ける最大荷重が使用者の転倒荷重500 Nであることを示し、本開発品の最弱部である、引き戸木材の強度設計荷重とした。さらに、高齢者が最も開けやすい引き戸の持ち手形状と、高齢者が発揮できる引き戸開口力から、引き戸開口力の目標値を初動5 N～10 N、最大20 N以下の設計条件値を設定した。これらの設計値は、人間工学的に高齢者が使いやすい設計条件となっているので、一般手摺にも用いることができるものとなっている。また、本開発品を使って、高齢女性と障がいを持つ男性のモニタリングを行った結果、歩行機能の回復・機能向上が認められた。本製品が高齢者および障がい者に安心して歩く環境を与え、それにより歩行意欲が増し、歩行機能の回復および機能向上に寄与することを立証できた。

(2) 第3章：手摺を有する引き戸において、開ける力をシミュレーションする理論式を求め、それを用いて引き戸を開口する力の解析と実験を行い、引き戸開口力の最大値が実測結果に対して本研究のシミュレーション方法を用いることによって誤差13%以内で一致することと、回転支点とローラーの高低差及びガイドレールの曲率半径を適切に組み合わせることによって引き戸開口力を目標19.6 N以下に設計できる目途を立てた。また、手摺高さを持ち手高さの人間工学的条件を満足し、持ち手の挟み込みを防ぐ曲線手摺を考案して持ち手と手摺の干渉を解決した。引き戸の安全性確認試験では、20万回の繰り返し開閉試験に耐えることができた。

(3) 第4章：木質材料の強度データの取り扱いにおいて、建築設計で最も重要な基準強度特性値 ${}_0F$ が、破断強度 σ_B に相当することを指摘した。また、基準許容応力度 ${}_0f$ が、疲労強度 σ_w に相当することを示した。これにより、木質材料の疲労耐久比 σ_w/σ_B を明らかにした。

また、製材が異方性材料であることに対し、構造用合板が原木の異方性を緩和し強度を向上させた等方材であることを明らかにした。さらに、日本建築学会(AIJ)とASTMの木材強度の算出方法から、ASTMとAIJから得られた係数の積 α_f が、静的強度に対する疲労限度の比 σ_w/σ_B であり、すなわち疲労耐久比に相当すること明らかにした。そして、AIJでは、引張りと圧縮の疲労耐久比が同じであることと、曲げと引張りの耐久比 σ_w^B/σ_B^B 、 σ_w^T/σ_B^T においてはAIJ、圧縮耐久比 σ_w^C/σ_B^C においては、ASTMを採用する方が安全であることを示した。

(4) 第5章：前章の見積法により求めた引張降伏応力、圧縮応力と、引き戸に固定させる手摺棒取付金具周辺に生じる最大引張応力および最大圧縮応力をそれぞれ比較した。その結果、最大引張応力 σ_{max}^T は、引張降伏応力 $\sigma_y^T = 7.8 \text{ MPa}$ よりも低いことが分かった ($\sigma_{max}^T < \sigma_y^T$)。また、最大圧縮応力 σ_{max}^C は、圧縮降伏応力 $\sigma_y^C = 5.8 \text{ MPa}$ よりも低いことが分かった ($\sigma_{max}^C < \sigma_y^C$)、十分な安全性を確認できた。さらに、手摺棒取付金具周辺を対象に最大応力振幅と平均応力を求め、耐久限度線図上で考察した結果、引張降伏強さ σ_y^T と両振疲労限度 σ_w を結ぶ耐久限度線の範囲内にあり、疲労強度的にも安全であった。試作された引き戸を用いて、取付金具に500 Nの負荷を繰り返し数 2×10^5 回で実体疲労試験を行った結果、使用上問題となる損傷が生じることなく、十分な耐用性が確認できた。

以上より，本論文での全体の結論は以下のようにまとめられる．手摺収納式引き戸装置は，人間工学に基づいて高齢者が使用しやすい形状寸法および開口力の設計目標を示した．設計された引き戸装置は，目標開口力を達成し，高齢者が操作しやすいものとなった．装置の強度検討では，第 4 章で求めた木質材料の強度性能値により，最弱部である引き戸木材の手摺棒取付金具周辺を解析評価し，その裏付けとして疲労実験を行った．その結果，解析と実験の両方から安全であることが示された．また，試作機のモニタリングテストにより，高齢者が本開発品で歩行機能を回復させ，さらに向上できたことで，本開発品の有用性が立証された．本論文で，人間工学に基づいて設定した設計目標値および木質材料の疲労耐久比は，本開発品に限らず他の福祉機器等に応用することが可能であることが示された．

謝 辞

本論文は、九州工業大学大学院工学研究院 野田尚昭教授の懇切丁寧なご指導のもとまとめ上げられたもので、終始変わらぬ熱心なご鞭撻と、格別のご配慮を賜り、論文を完成させることができました。これはひとえに野田教授のご指導のおかげであり、ここに心より感謝の意を表します。

この研究は、ケイ・プロダクツ(株)社長の久保嘉孝氏が、平成 17 年に建設事業に関するベンチャー企業を立ち上げて間もない頃、御実父様の 1 年間にわたる闘病生活の介護経験で、掴まり立ちで自立歩行する入院患者は、手摺がないところでは先に進めないため、自力で移動できないこと。既存の装置は手摺が枠に干渉し開けられないことから、部屋から部屋への移動に自力歩行できないことを知ることとなりました。久保嘉孝社長は自力で自由にトイレや浴槽あるいは室外への移動ができれば、入浴、トイレは一人で行けるし、介護者の負担も減るばかりでなく介護そのものが不要となるのではと思いをはせ、安全で使いやすい「引き戸装置」の開発を決意し、5年の歳月をかけて高齢者、障がい者が使用できる「手摺収納式引き戸装置」を開発されたものである。

筆者は、開発の初期に協力したことから学位論文を提出する機会を得たことに、久保嘉孝社長に深く感謝いたします。さらに、引き戸繰り返し試験、モリタニングの実施と画像データ収集、建築設計および高齢者・障がい者施設に関する情報や知見等多大のご指導、ご助言を賜りました。久保嘉孝社長の発明に基づいたご協力なくして論文の完成は全く見込めない状態であったことをここに記し、深甚の謝意を表します。

誠にありがとうございました。この研究の大部分は、平成 26 年度中小企業・小規模事業者連携促進支援補助金（農商工等連携対策支援事業）に採択されて実施したものです。申請書の作成と事業の推進において、元九州工業大学 地域共同研究センター長である田中洋征教授に主導的にお世話になり、また博士論文の外部審査員としても、ご指導・ご助言を頂きました。深く感謝申し上げます。

九州工業大学大学院工学研究院 赤星保浩教授、九州工業大学大学院工学研究院 松田健次教授、九州工業大学大学院生命体工学研究科 山田宏教授に学位論文審査委員として、貴重なご助言とご教示を頂きました。厚く御礼を申し上げます。また、丸栄加工(株)顧問 佐野義一博士、大学院工学研究院 高瀬康博士・専門職員には、研究全般に亘ってご指導を頂きました。深く感謝申し上げます。

さらに、九州工業大学工学部弾性力学研究室の皆様には、研究の遂行の上でご協力とご助力を頂き

ました。ここに感謝の意を表します。皆様のご支援と激励を心より感謝申し上げます。

英語論文作成に当たっては、ひびき技術翻訳センター 林紀和子様に英語翻訳のご指導を賜りました。深く感謝申し上げます。最後に、博士後期課程の3年間にわたって研究ならびにその他のご支援頂きました皆様に深く感謝申し上げます。