

耐熱ガラスクロスを用いた延焼防止技術に関する研究開発

村岡 宏 吉野 攝津子
山口 純一

Research and Development of Techniques for Preventing the Spreading of Fire Using a Heat Resistant Glass Cloth

Ko Muraoka Setsuko Yoshino
Junichi Yamaguchi

Abstract

We developed techniques to prevent fires from spreading by using a heat-resistant glass cloth, such as a Noren-type fire-resistant screen, Walk-through fire-resistant screens and corner-jointed screen are discussed in chronological order. Furthermore, our recent approaches to develop techniques for improving heat-resistant glass cloths are outlined. We demonstrate the application of glass cloth to a fire spread prevention technique in a freeway tunnel, a study on heat insulation with multi-layer fire-resistant screens, and an improved screen-door that allows wheelchair access.

概要

本報では、のれん型の耐火スクリーンから始まってウォークスルー耐火スクリーン、コーナージョイントスクリーンへと至る耐熱ガラスクロス(シリカクロス)を区画材料として用いた各種延焼防止技術に関する開発の変遷を紹介すると共に、道路トンネルの延焼防止技術への展開、複数枚の耐熱ガラスクロスで構成される耐火スクリーンの断熱性能に関する検討、車いすの自力避難を容易にするためのスクリーンドアの改良など、耐熱ガラスクロスを用いた延焼防止技術に関する最近の研究開発について述べる。

1. はじめに

ガラス繊維を素材とするクロスは基本的に不燃であることから建築物の防災設備において、樹脂コーティングされたガラスクロスがロール式の防煙たれ壁の構成部材として使用されている。但し、ガラスクロスは500~600°C程度で熔融することから、建築基準法で定められている1時間の遮炎性を有する特定防火設備の区画材料として用いるには耐熱性能が不十分である。

ウェットスクリーンはこのような問題を解決するために開発されたものであり、樹脂コーティングされたガラスクロスの両面に散水して耐熱性能を高めることで、旧38条における大臣認定を取得して超高層オフィスビルの高層面積区画に適用された¹⁾。

このウェットスクリーンの開発と並行して、二酸化ケイ素(SiO₂)を主成分とする1000°C以上の耐熱性を有する耐熱ガラスクロス(シリカクロス)に着目し、鋼製の防火防煙シャッターの代替となる軽くて柔軟な区画材料による新しい延焼防止技術の開発に着手した。

本報ではこれまで行ってきた耐熱ガラスクロスを用いた延焼防止技術の開発の変遷を紹介すると共に、耐熱ガラスクロスによる延焼防止技術のさらなる展開を目指して行った各種の性能検証実験について報告する。

2. 耐熱ガラスクロスを用いた延焼防止技術

2.1 のれん型の耐火スクリーン

のれん型の耐火スクリーンは16年前の開発着手時に考案されたシステムである。床から1,800mmの高さまで300mm間隔で切れ込みが設けられて短冊状となっているので、人は自由に通り抜け可能である(Photo 1参照)。短冊状の耐熱ガラスクロスの下端部にはマグネットを内蔵したウェイトが取り付けられており、降下ラインの床に置かれた鋼製のプレートに吸着する。また、短冊状のクロス同士は互いに重なり合いながら2列に千鳥配置されており、圧力差が生じた場合でも隙間は最小限に抑えられる。このシステムの耐火性能を把握するため、間口1,900mm、奥行4,000mm、高さ2,300mmの実験用小部屋を2室に仕切るようにのれん型の耐火スクリーンを設置し、片側の室でn-ヘプタンを燃焼させて模擬火災を再現した。さらに、片側の室に給気を行い、のれん開口部からの漏気量を測定して常温下での気密性能を確認した²⁾。

これらの実験の結果、耐熱ガラスクロスは鋼製の防火シャッターに匹敵する耐火性能を有することを確認した。但し、気密性能については閉鎖時の流量係数(隙間の大きさを表わす係数)が0.01程度であり、一般的な防火シャッターや防火戸の流量係数0.005と比較して隙間量が大きいが判明した。

2.2 スクリーンドアの開発

のれん型のスクリーンは人が通過する際にのれん部の短冊状クロスが絡まったりすることで、通過後の気密性能の回復が期待できない場合があった。そこで、スクリーン面にL字型の切れ込みを設け、L字の対角線を軸に扉のように開閉するスクリーンドアを考案した。スクリーンドアの下端は金属製のウェイトバーが装着されており、このバーが開放と共に斜め上方にはね上がるので、通過後、手を離せばスクリーンドアは自重により閉鎖する。スクリーンドア下端のバーとスクリーンドア部以外のスクリーン下端のバーは可動軸をスクリーンドアの対角線に合わせた丁番で接合されており、スムーズな開閉の再現性が期待できる。また、スクリーンドア部のクロスとメインのクロスとは閉鎖時に200mm程度の幅で重なり合っており、スクリーン内外に圧力差が生じた場合は互いのスクリーンが吸着して気密性が向上する。Fig. 1にスクリーンドアの基本概念図を示す。

このスクリーンドアの耐火性能、気密性能、避難者からの認知性、避難者の流動特性等に関する検証実験を行った。まず、気密性能についてはスクリーン内外の圧力差が30Pa程度までは防火防煙シャッターと同等の気密性能が確保できることを確認した。これまでにない新しい概念の開閉機構であるため、初めて目にする避難者が非常口と認知して使用するかどうか当初懸念されたが、スクリーンドア正面に非常口のサインを適切に表示すれば、通常の扉と同じように避難用の出口として認識されることが被験者実験により確認された³⁾。このスクリーンドアによるウォークスルー耐火スクリーンは計画建物毎に指定性能評価機関における防災性能評定を受けた後、建築基準法38条に基づく大臣認定を取得して実物件に適用された。

2.3 製品毎の大臣認定取得に向けた取り組み

平成12年に建築基準法が改正され、建築基準法38条が廃止されたことにより、耐熱ガラスクロスを用いたスクリーンシャッターについては建築基準法に定める特定防火設備・防火設備として国土交通大臣の認定を製品毎に

取得することにより一般的に使用することが可能となった。但し、これまでの特定防火設備・防火設備の性能評価方法では耐熱ガラスクロスのような柔軟性のある材料を用いて試験体サイズを超える製品を評価する方法が確立されていなかったため、開口拡大に関する技術指針を新たに作成する必要があった。このため、(社)日本シャッター・ドア協会(JSDA)における性能評価技術指針の原案作成に協力すると共に、座板の熱変形に関する評価検証式の妥当性を検証するための大型サイズの遮炎性能実験(開口幅4.3m、開口高3m)を実施した。これらの



Photo 1 のれん型の耐火スクリーン
Noren-type Fire-resistant Screen

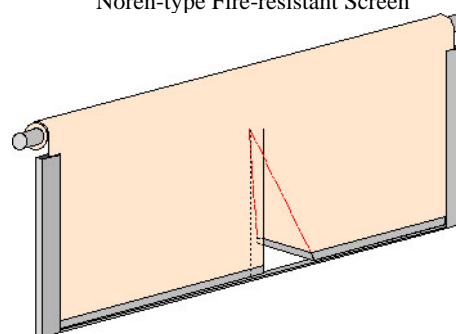


Fig. 1 スクリーンドアの基本概念図
Schematic Diagram of Screen-door

Table 1 大臣認定における性能試験及び評価項目の一覧
Performance Tests and Evaluation Items Required for Minister's Approval

認定種別	特定防火設備の遮炎性能 (令112条第1項に基づく)	防火設備の作動性能等 (令112条第14項第二号に基づく)	防火設備の作動性能等 (令112条第14項第一号に基づく)
性能試験	<ul style="list-style-type: none"> 遮炎性能試験^{*1} クロスの熱間強度試験^{*2} 	<ul style="list-style-type: none"> 遮煙性能試験^{*1} 作動性能試験^{*1} 避難口の開閉力試験^{*1} 避難者通過試験^{*1} 危害防止措置試験^{*1} 自動閉鎖装置の耐熱性試験^{*1} 	<ul style="list-style-type: none"> 作動性能試験^{*1} 避難口の開閉力試験^{*1} 避難者通過試験^{*1} 危害防止措置試験^{*1} 自動閉鎖装置の耐熱性試験^{*1}
拡大評価	<ul style="list-style-type: none"> 座板変形量の熱変形検証^{*2} クロス強度・座板持ち上がりの検証^{*2} 	<ul style="list-style-type: none"> 遮煙性能(漏気量)の検証^{*2} 危害防止性能(圧迫荷重)の検証^{*1} 	<ul style="list-style-type: none"> 危害防止性能(圧迫荷重)の検証^{*1}

*1: 指定性能評価機関の業務方法書に基づくもの。

*2: (社)日本シャッター・ドア協会の耐火クロス製防火・防煙スクリーン技術標準に定められた方法によるもの。

実験の結果、開口幅 10m までは技術指針の妥当性が確認された。

新たに作成された性能評価方法は最終的には各評価機関における業務方法書、及び J S D A の技術標準⁴⁾としてまとめられた。Table 1 に認定種別毎の性能試験及び性能評価項目の一覧を示す。

2.4 ウォークスルー耐火スクリーン

事務所ビルの高層面積区画では、一般的に区画1ヶ所当たりの長さは15～20m程度であり、可能であれば途中にレールポストを設けず一台のシャッターで区画することが望まれる。そこで、開口幅が20mを超えるウォークスルー耐火スクリーンの大臣認定取得を最終目標とした技術的検討を行った。製品毎の大臣認定を取得する際に実施する遮炎性能試験においては、開口下端部を除いて炉内側(火災側)が見える隙間が生じることは許容されない。旧38条認定時に開発されたスクリーンドアの場合、ドア部のクロスとドア部以外のクロスの重ね部から炉内が見えてしまい不合格となる。このため、Fig. 2 に示すように、小扉を設けて3枚重ねとし、横方向から炉内が見えない構造のスクリーンドアを考案した。

また、遮炎性能に関する拡大評価については、通常は J S D A の技術標準に基づいて火災時に20Paの圧力差が区画内外に生じると想定し、垂直断面、水平断面における2次元の力のつり合い式よりクロスに生ずる応力、ならびに座板の持ち上がりの有無に関する検討を理論的に行う。しかしここでは、申請する開口幅が10mを超えるため、より詳細な応力解析を行う必要があった。このため、膜構造物の応力解析に用いられる有限要素法による3次元応力解析手法に基づく検証も合わせて実施した。

これらの実験・検証により、遮炎性能に関しては最大で開口高さ6m、開口幅25mの区画サイズに適用できる製品の大臣認定を取得した。一方、遮煙性能に関しては試験体サイズの5倍まで、あるいは拡大サイズにおける遮煙性能検証式の判定結果に基づき、開口幅については最大14.5mまでの認定取得となった。

2.5 コーナージョイントスクリーン

これまでの防火シャッターや耐火スクリーンは平面的に見て線形の区画を構成するものであるが、吹抜やエスカレーターなどの堅穴のまわりを区画する場合、コーナー部には必ずガイドレールを有する柱が必要であり、この柱は意匠性を損なうと共に、日常動線の障害となっていた。そこで、直交する耐火スクリーン同士をスライドファスナーで接合することにより、平面的に見てコの字型やL型の区画を一台で構成するコーナージョイントスクリーンを考案した。Fig. 3 にエスカレーターまわりの堅穴区画に設置した場合の透過図を示す。天井裏に置かれる巻き取りシャフトは区画を構成する辺毎に分かれており、それぞれのシャフトはかさ歯車で連結されているので、スクリーンが降下・上昇する際に各辺のシャフトは

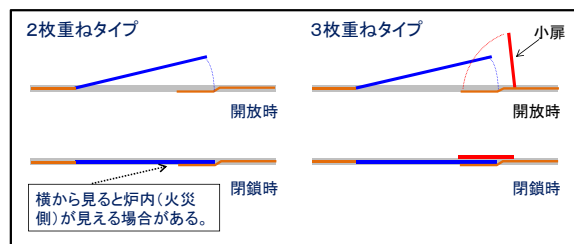


Fig. 2 スクリーンドアの開閉のしくみ
Opening Mechanism of Screen-door



Fig. 3 コーナージョイントスクリーンの透過図
Transparent View of Corner-Jointed Screens

Table 2 熱間引張強度試験結果
Results of High-temperature Tensile Test

引張強度 (kN/m)	No.1	No.2	No.2	平均値	
クロス部	常温	46.3	55.8	68.5	56.8
	熱間 ^{*1}	17.7	18.0	18.1	17.9
縫製部	常温	12.2	11.3	9.4	11.0
	熱間 ^{*1}	1.2	1.1	1.1	1.1
ファスナー部	常温	10.0	9.2	9.7	9.6
	熱間 ^{*1}	1.6	1.4	1.4	1.5

*1: 雰囲気温度720℃中での引張試験

同調して回転する。コーナー部のファスナーは天井裏に設置されたスライダー(ファスナーを開閉する金具)をスクリーンが通過することにより、天井裏では接合が解除されてスクリーンがそれぞれのシャフトに巻き取られ、天井下では接合されて一体の防火区画を形成する。

スライドファスナーについては耐火性が要求されるため、既に別の用途で市販されていたテープ部がステンレス糸で織られた製品を用いた。このスライドファスナーの高温時特性については、耐火クロススクリーン技術標準に基づくクロスの熱間引張強度試験を行った結果、常温・熱間(雰囲気温度720℃)のファスナー部の引張強度は縫製部の引張強度とほぼ同等であった(Table 2参照)。

また、平面形状がL字型やコの字型の場合の遮炎性能試験を行うと共に、開口拡大の検証のため、3次元応力解析を様々な開口寸法において実施した。これらの実験及び解析結果より火災時の温度・圧力条件においても座板の浮き上がりやガイドレール部におけるクロスの抜けや破断は生じないことを確認した。

さらに、1500回の連続昇降による耐久試験、遮煙性能

試験等、遮煙性能を有する特定防火設備に要求される諸性能を確認するための実験・解析を行った結果、最終的に開口高：2m～6m、避難口ありの場合は各辺の合計幅が2.4m～14.5m(一台当たり3辺まで)となる区画サイズに対応可能な大臣認定を取得することができた⁵⁾。

3. 道路トンネルの延焼防止技術への適用検討

火災時の延焼防止のため、道路トンネルを一定間隔毎に区画した事例は既存の長大トンネルではなく、現状の技術基準においても区画の設置は義務付けられていない。しかし、大深度地下の長大道路トンネルでは、火災時のリスクは大きくなり、火災発生場所の両側をすみやかに区画することができれば、避難安全性、及び消防・救助活動時の安全性が格段に向上すると考えられる。

近年、トンネル内の延焼防止技術として水幕による区画技術が提案されてきたが⁶⁾、耐熱ガラスクロスも素材の柔軟性を生かすことによりトンネル内の区画材料として活用できると考えられる。

道路トンネル内の耐火性能を評価する際には、建築空間における標準加熱曲線(ISO834)に相当する曲線としてRABT曲線を用いるが、この曲線では5分後に最高温度1200℃となり、ISO834における1時間後の最高温度945℃と比較して最高温度が255℃高い。従って、道路トンネル内に耐火クロスによる区画材料を適用する場合は、まず耐火クロスの高温時強度を確認する必要がある。

そこで、最高1200℃までの熱間強度試験を行い、耐火クロスの高温時強度を確認すると共に、実大の区画部材に生じると予想される最大強度との比較を行い、道路トンネルの区画材料への適用可能性を検討した。

3.1 試験方法

熱間強度の試験方法は前述のJSDAの技術標準⁴⁾に従った。耐熱ガラスクロスの試験体は両面に酢酸ビニル系の樹脂コーティングがされたシリカクロス(厚さ0.7mm)とし、縫製なしと縫製ありの2種類で試験を行った(Photo 2 参照)。縫製系にはステンレス糸を用い、縫製ラインは2重としている。

試験は極超高温材料試験機(MTS808型)を用いた。この試験機は小型電気炉によって試験体の雰囲気温度を一定に保持した状態で引張試験を行うことが可能である(Photo 3 参照)。試験条件をTable 3に示す。試験は昇温速度50℃/minで試験温度まで上昇させた後、10分間保持し、その後、引張試験を行った。

3.2 試験結果

Table 4に試験体A(縫製なし)、及び試験体B(縫製あり)の各試験における引張強度の最大値を示す。試験体B(縫製あり)では当初試験温度1200℃において試験を実施したが強度低下が著しく有意な結果が得られなかったため、試験温度1080℃のデータを取得した。試験体の熱間強度

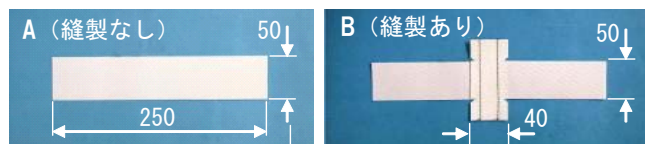
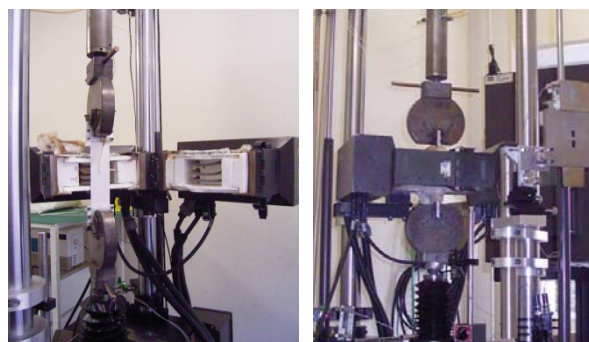


Photo 2 熱間強度試験体の形状
Specimen of High-temperature Tensile Test



(a) 加熱炉の蓋を開けた状態 (b) 試験中の状態
Photo 3 熱間強度試験時の状況

High-temperature Tensile Test

Table 3 試験条件
Conditions of High-temperature Tensile Test

試験温度	20℃, 720℃, 960℃, 1080℃, 1200℃
引張速度	30mm/min
昇温速度	50℃/min
温度保持時間	10min
試験本数	A・・・20℃, 720℃, 960℃, 1200℃ 各3本
	B・・・20℃, 720℃, 960℃, 1080℃ 各3本

Table 4 熱間引張強度試験結果
Results of High-temperature Tensile Test

試験体	試験温度(℃)	引張強度(kN/m)				常温強度に対する比率
		No.1	No.2	No.3	平均値	
A (縫製無)	20(常温)	46.3	55.8	68.5	56.8	—
	720	17.7	18.0	18.1	17.9	32%
	960	18.0	15.8	18.5	17.4	31%
	1200	15.8	12.4	17.1	15.1	27%
B (縫製有)	20(常温)	12.2	11.3	9.4	11.0	—
	720	1.0	1.2	1.1	1.1	10%
	960	1.3	1.3	1.4	1.3	12%
	1080	0.9	1.1	0.8	1.0	9%

の平均値は縫製なしの場合で常温強度の30%程度、縫製ありの場合では常温強度の10%程度となり、縫製ありの方が熱間の強度低下が大きい結果となった。

3.3 トンネル区画部材への適用検討

トンネル内に防火区画を形成する場合、一枚のスクリーンを天井部から自重降下させて区画を形成する方法や短冊状のクロスを複数枚、天井部から垂下させてのれん

のように防火区画を形成する方法が考えられる。いずれの場合も、圧力差によって耐火クロスに作用する引張力は Fig. 4 のようにクロスの上端と下端が拘束された時のクロス上端に作用する引張力 F_t (N/m) を考えれば安全側の想定となる。 F_t は圧力差による引張力 F_{t1} (N/m) とクロスの自重による引張力 F_{t2} (N/m) の和となり(1)式で求められる。

$$F_t = F_{t1} + F_{t2} = \frac{\Delta P \cdot H}{2\sqrt{2k\left(\frac{16k}{8k^2+2}\right)\left\{1+\left(\frac{16k}{8k^2+2}\right)k\right\}}} + \frac{mgH}{\left\{1-\left(\frac{16k}{8k^2+2}\right)k\right\}} \quad (1)$$

H : 開口高さ(m), R : たわみによる円弧の曲率半径(m)
 ΔP : 区画内外の圧力差 (Pa), δ : 耐火クロスたわみ量 (m)
 m : 単位面積当りのクロス重量 (kg/m²)

ここで k は耐火クロスのたわみ量 δ (m)の天井高さ H (m)に対する比例定数であり、 $\delta=kH$ となる。
 (1)式より $k=0.1$ の場合の開口高と区画内外の圧力差に応じて生じる引張力の計算結果を Fig. 5 に示した。縫製なしの場合、1200℃雰囲気中の引張強度は3回の試験の最小値が12.4kN/mである(Table 4 参照)。また、縫製ありの場合、1080℃雰囲気中の引張強度は3回の試験の最小値が0.8kN/mとなる。区画内外に生じる圧力差が200Pa程度であれば、縫製がない場合は1200℃雰囲気中においても十分な強度を有していると言える。

3.4 道路トンネル区画技術の提案

耐熱ガラスクロスを利用したトンネル区画技術の1例として、のれん型の区画システムを考案した。火災時には中央監視室からの遠隔制御により火災が発生したゾーンの両側に短冊状のクロスが複数枚降下し、区画を形成する。Fig. 6 に示すように、区画直下に延焼媒体である車両が存在した場合でも、複数の短冊状クロスが隙間を塞ぐことである程度の延焼防止効果は期待できる。また、柔軟な素材であるため、降下後に万一、車両がクロスに衝突しても、乗員の被害は最小限に抑えられる。のれん型なので、区画形成後も人や車両の通り抜けはもちろん可能である。

4. 耐熱ガラスクロスの断熱性能に関する検討

建築基準法に規定されている防火設備については断熱性能に関する要求条件はないが、非加熱側に透過する熱流が大きい場合、非火災側の可燃物に着火する可能性があることや、避難経路、あるいは消防活動拠点が防火設備によって区画されている場合は避難者や消防活動に与える影響を少なくするためにも断熱性能の確保は重要である。

耐熱ガラスクロスは鋼板よりも断熱性が優れているも

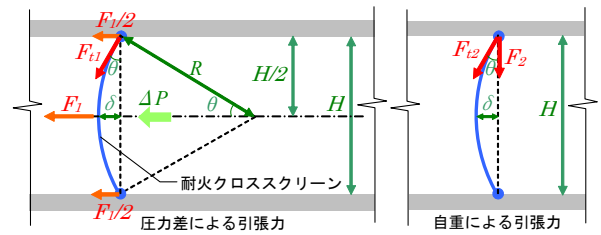


Fig. 4 耐火クロスの上端に作用する引張力
Tensile Force at the Upper End of Fire Resistant Cloth

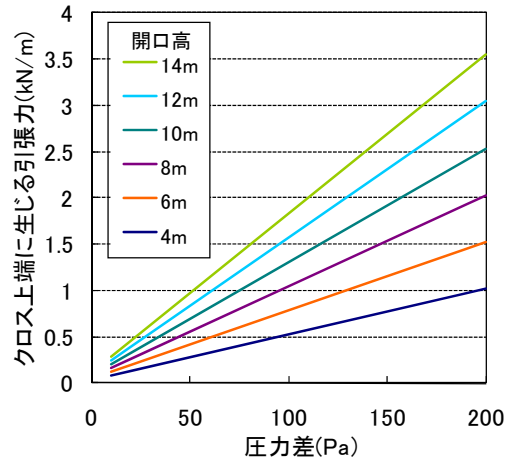


Fig. 5 圧力差とクロス上端部の引張力との関係 (k=0.1)
Relationship between Pressure Difference and Tensile Force at the Upper End of the Cloth (k=0.1)

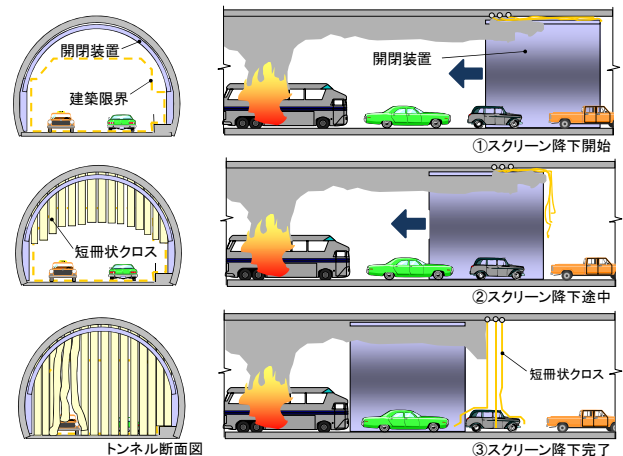


Fig. 6 道路トンネルにおけるのれん型の区画システム
Noren-type fire shutters in Freeway Tunnel

の、1枚だけで区画が構成されている場合は、上述の避難経路や消防活動拠点を対象とした人間行動の安全性を確保するのは困難である。断熱性を向上する比較的簡便な方策として複数枚の耐火スクリーンで区画を構成する方法があるが、必要とされる断熱性能に対して、どの程度の設置枚数、設置間隔が妥当であるかを判断する定量的なデータが得られていなかった。

このため、耐熱ガラスクロスによるスクリーンの断熱

性能がスクリーンの設置枚数、設置間隔によってどのように変化するかを定量的に把握するための実験を行った。

4.1 実験方法

大林組技術研究所保有の壁用耐火炉に3枚の耐火スクリーン(幅1.5m, 高さ1.5m)が設置できる金属製枠を取り付け、非加熱側のスクリーン中央から水平距離1m離れた点における放射熱流束ならびに各スクリーンの加熱側、及び非加熱側の表面温度を測定した。Photo 4に加熱炉にセットされた試験体の状況を示す。加熱方法については建築基準法の特定防火設備の遮炎性能試験におけるISO834の標準加熱温度曲線に従った。

Fig. 7に熱電対、及び放射計の設置位置を示す。スクリーンの表面温度は熱電対の先端部がスクリーン表面に接触するようにステンレス糸でクロスに縫いつけ、さらに先端部をクロスにウレタン樹脂系の布用接着剤で固定した。空気層の温度はスクリーン中央部にステンレス糸で縫いつけた鋼線製スペーサーを利用して熱電対を取り付けた。なお、熱電対(K型)は加熱面のみ素線径0.65mmとし、その他はすべて素線径0.32mmとした。放射計はメドサム社製64シリーズ(サファイヤ窓付)を用いた。各温度、及び放射熱流束は10秒間隔でデータロガーにより記録した。

4.2 実験ケース

スクリーンの枚数、種類、設置間隔を変えて合計12ケースの加熱実験を行った。実験条件をTable 5に示す。実験に用いた耐熱ガラスクロスは両面に酢酸ビニル系の樹脂コーティングがされたシリカクロス(厚さ0.7mm)を用いた。なお、実験ケース⑩～⑫では3枚の内、中間のスクリーンに片面がアルミ蒸着されたアルミ張りガラスクロス(厚さ0.55mm)を用いた。

4.3 実験結果

4.3.1 試験体裏面温度の比較 Fig. 8に実験ケース⑤(スクリーン3枚, 間隔50mm)における各スクリーンの表面温度推移(3点の平均値)を示す。各スクリーンの表面温度は非加熱側に近い程、低下しており、加熱温度に応じて上昇・減衰していることが分かる。

このようにして得られた各実験ケースの試験体裏面温度(非加熱側温度)を比較した。Fig. 9に加熱60分後(59～60分の平均)における各試験体の裏面温度を示す。試験体の裏面温度はスクリーンの枚数が増える程低くなる。また、同じ枚数であっても間隔が大きいほど、裏面温度は低い傾向が見られる。

4.3.2 放射熱流束の比較 Fig. 10に加熱10分後(±20秒分の平均値)における各試験体の放射熱流束を示す。また、Fig. 11に加熱60分後(59～60分の平均)における各試験体の放射熱流束を示す。裏面温度の場合と同様にスクリーンの枚数が増える程、また、同じ枚数であっても間隔が大きいほど、放射熱流束は小さくなる。3枚のスク



Photo 4 壁炉に取り付けられた試験体
Specimen Attached Fire Testing Furnace

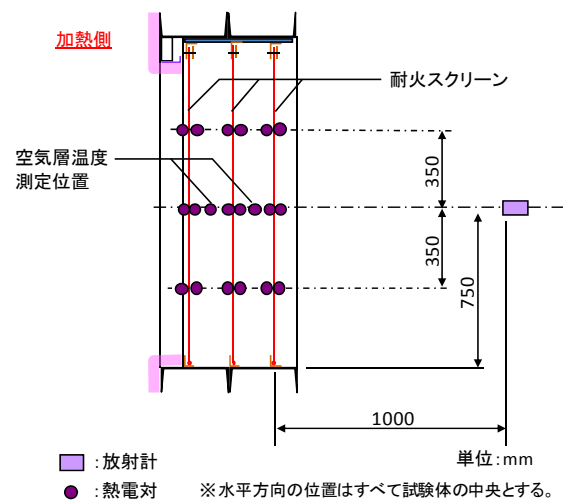


Fig. 7 温度及び放射の測定位置(縦断面図)
Measurement Positions of Temperature and Radiation
(Vertical Section View)

Table 5 実験条件
Experimental Conditions

実験ケース	スクリーン枚数	スクリーン間隔(mm)	備考	
①	1	0	加熱側・及び非加熱側のスクリーン表面温度以外のスクリーン表面温度は測定しない。	
②	2	0		
③	3	0		
④	2	50		
⑤	3	50		
⑥	2	100		
⑦	3	100		
⑧	2	150		
⑨	3	150		
⑩	3	50		中間のスクリーンは片面アルミ蒸着ガラスクロスとする。(非加熱側をアルミ蒸着面とした。)
⑪	3	100		
⑫	3	150		

リーンのうち1枚をアルミ貼りガラスクロスとしたケースと3枚共シリカクロスのケースを比較すると、アルミ貼りクロスを挟んだケースの方が放射熱流束は小さくなるが、10分後よりも60分後の方が熱流束の差が小さくなっている。加熱後の試験体を観察すると、アルミ蒸着膜が溶融・消失していることや、測定結果よりアルミ貼りク

ロスの表面温度が500℃を超える加熱20分頃から断熱効果が無くなることが確認されており、アルミ蒸着膜の放射低減効果は膜近傍温度が500℃までは持続すると考えられる。

4.4 ケーススタディ

実験により得られた各ケースの60分後の非加熱側スクリーン表面温度実測値を用いて、スクリーンから一定の距離離れた受熱点における放射熱流束を試算し、延焼防止及び避難安全の観点から性能を満足するかどうか確認した。

非加熱側への放射熱により非加熱側の可燃物が着火しない条件は、放射熱流束が10kW/m²以下とした⁷⁾。

また、避難者の放射熱からの安全に関する許容基準は、避難空間内の避難者が曝される熱流束について(2)式の条件を満足するものとした⁷⁾。

$$I^2(t_2 - t_1) < 2.5 \times 10^2 \quad (2)$$

ただし

$$I = \begin{cases} q''_{\max} - 0.5 (q''_{\max} > 0.5) \\ 0 (q''_{\max} \leq 0.5) \end{cases}$$

q''_{\max} : 避難者への入射熱流束の最大値[kW/m²]

t_1 : 当該避難者が放射受熱に暴露され始める時間[s]

t_2 : 当該避難者への放射受熱の暴露が終了する時間[s]

例えば、避難時間（安全空間における滞留時間）が30秒の場合、(2)式より

$$I < \sqrt{\frac{2.5 \times 10^2}{30}} = 2.9 \text{ [kW/m}^2\text{]}$$

従って、 $q''_{\max} < 3.4 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ がクライテリアとなる。

非加熱側スクリーンからの放射熱による入射熱流束 q''_{rad} は(2)式により求めた。

$$q''_{rad} = F\sigma\varepsilon(T_s^4 - T_o^4) \quad (3)$$

T_s : 非加熱側スクリーン表面温度[K], T_o : 常温[K]

(293Kとする), F : 形態係数, ε : スクリーンの放射

率, σ : ステファンボルツマン定数 (5.67×10^{-11})
[kW/m²K⁴]

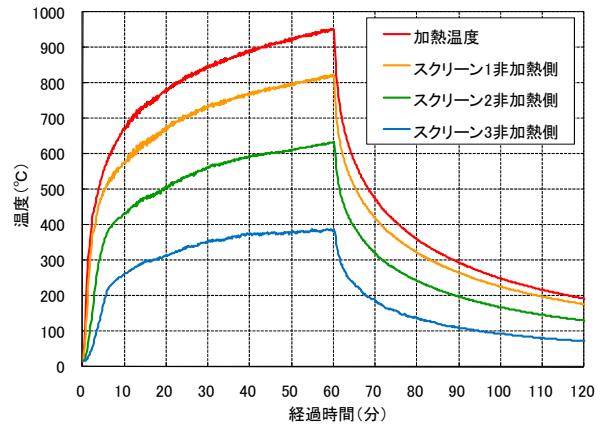


Fig. 8 測定温度の時間変化(実験ケース⑤)
Time Histories of Measured Temperature (Case 5)

Table 6 放射熱流束の試算結果
Calculated Results of Radiant Heat Fluxes

スクリーン枚数	スクリーン設置間隔(mm)	受熱点における放射熱流束(kW/m ²)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	23.04	14.98	9.51	6.34	4.61	3.17	2.59	2.02
	50	12.68	8.25	5.23	3.49	2.54	1.74	1.43	1.11
2	50	11.07	7.19	4.56	3.04	2.21	1.52	1.24	0.97
	100	9.98	6.49	4.12	2.74	2.00	1.37	1.12	0.87
	150	9.82	6.38	4.05	2.70	1.96	1.35	1.10	0.86
	200	9.70	6.28	3.98	2.66	1.93	1.33	1.08	0.84
3	0	7.80	5.07	3.22	2.14	1.56	1.07	0.88	0.68
	50	7.39	4.80	3.05	2.03	1.48	1.02	0.83	0.65
	100	7.24	4.71	2.99	1.99	1.45	1.00	0.81	0.63
	150	5.36	3.48	2.21	1.47	1.07	0.74	0.60	0.47
スクリーンと受熱点の 離間距離(m)		1	2	3	4	5	6	7	8
形態係数		0.8	0.52	0.33	0.22	0.16	0.11	0.09	0.07

■ : 延焼防止上も避難安全上もNGとなるケース
■ : 延焼防止上はOKだが、避難安全上はNGとなるケース
■ : 延焼防止上も避難安全上もOKとなるケース

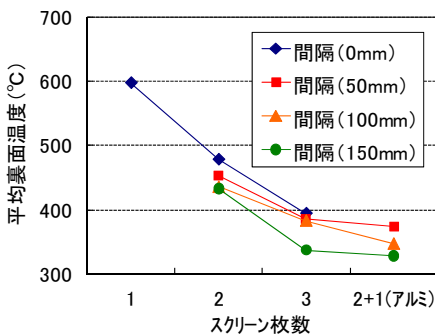


Fig. 9 試験体平均裏面温度の比較
(加熱60分後)
Comparison of Unheated Surface
Temperature (60 min after starting)

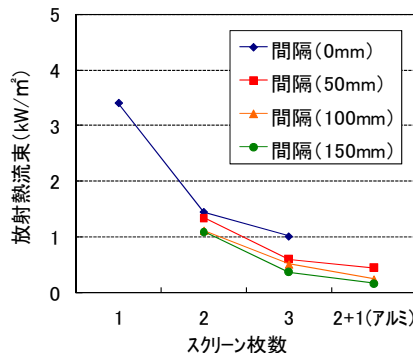


Fig. 10 放射熱流束の比較
(加熱10分後)
Comparison of Radiant Heat
Fluxes (10 min after starting)

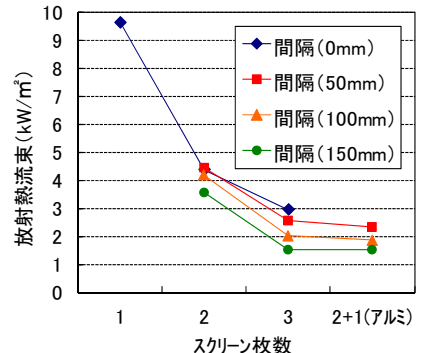


Fig. 11 放射熱流束の比較
(加熱60分後)
Comparison of Radiant Heat
Fluxes (60 min after starting)

Table 6 にスクリーンの幅が 5m、高さが 3m の場合の放射熱流束の試算結果を示す。受熱点は安全側を想定して、スクリーン面(放射面)の重心の延長線上において正対する微小面とした。また、スクリーンの放射率は放射熱流束と裏面温度の実測値より導出した $\epsilon=0.9$ とした。

1枚のスクリーンでは6m離れていないと延焼防止と避難安全の両方の性能を満足しないが、3枚重ねることにより3mの離間距離で延焼防止と避難安全の両方の性能を満足することがTable 6から読み取れる。

5. 車いす利用者のためのスクリーンドアの改良

2章で紹介したスクリーンドアは沓摺部の金属部材(座板)によって生じる段差があり、車いす利用者が自力で通過する際に支障をきたす場合がある。ウォークスルー耐火スクリーンは現在、病院や老人福祉施設にも多く適用されており、既設の製品に対しても車いすの自力避難時の通過性能を向上させる方法を検討する必要がある。

本章では既設の製品に取り付けることで車いすの通過性能が向上する各種部材の試作と、それらの性能を定量的に評価した被験者実験について述べる。

5.1 スクリーンドアの座板部の段差に関する問題

現在、市販されているウォークスルー耐火スクリーンのスクリーンドアにおける沓摺部の座板断面図を Fig. 12 に示す。この断面形状において、段差の高さは 28~30mm である。避難者が歩いて通過する際にこの段差につまずくことがないように約 45° の角度で面取りが施されている。なお、この断面図でテークスイッチとあるのは、降下時に人がはさまれないように、人等が接触した場合に降下を停止させるためのスイッチである。

このようなスクリーンドアの座板を車いすが乗り越える場合、車いすの前輪がまず段差を乗り越えなければならないが、車いすの前輪は一般的に径が小さいので乗り越える際に支障となる場合が多い。

一般的に質量 $m(\text{kg})$ 、半径 $r(\text{m})$ の車輪が高さ $h(\text{m})$ の段差を乗り越える場合の力学的性状を簡略に考ええると、Fig.13に示すように段差の角での抗力 N 、重力 mg 、水平方向の加力 F とのつりあいとなり、車輪中心と段差の角とを結ぶ線分の水平線からの角度を θ とすると(4)式で表すことができる。

$$F = \frac{mg}{\tan \theta} = \frac{\sqrt{r^2 - (r-h)^2}}{r-h} \cdot mg \quad (4)$$

これより、水平方向の加力 F が(5)式を満足する時、車輪は段差を乗り越える。

$$F > \frac{\sqrt{h(2r-h)}}{r-h} \cdot mg \quad (5)$$

つまり、段差の高さ h が等しい場合、車輪の半径 r が小さいほど車輪は段差を乗り越えにくいと言える。

5.2 試作品の検討

車いすの前輪が座板の段差を乗り越えやすくなるための付加的な改良部材を5種類試作した。

Table 7に試作品の一覧を示す。Aタイプは座板の面取り部分での車いす前輪の空回りを防止する意図で、座板の面取り部分にステンレス製のすべり止め部材を設けたものである。

Bタイプは段差の途中にステップ状のつめを設けて、段差を2段階に分けて乗り越えやすくしたものである。つめを長くすると天井に巻き上げる際にまぐさ部分にあたってしまうため、15mm程度が限度と考えられる。

Cタイプは段差緩衝タイプの改良部材であり、天井巻き上げ時に支障のないようにシリカクロスを用いてやわらかい部材としたものである。巻き上がった状態でクロスの緩衝部材が天井からぶらさがった状態になるので意匠性に難がある。

Dタイプも段差緩衝タイプの改良部材であり、巻き上げ時は座板の上に折りたたんだ状態で収納され、火災時に降下して座板に着床する時に自動的に緩衝部材(厚さ 11~12mm)が展開する機構となっている。

Eタイプは長さ 150mm のアルミ板をスロープ状に取り付けたものである。

5.3 通過性能評価実験

5.3.1 実験概要 A~Eの5種類の試作品の通過性能を定量的に評価するための被験者実験(40~50歳代の男女:5名)を行った。実験に用いた車いすは前輪の直径が90mmであり、一般的なタイプに比べてやや小さめである。

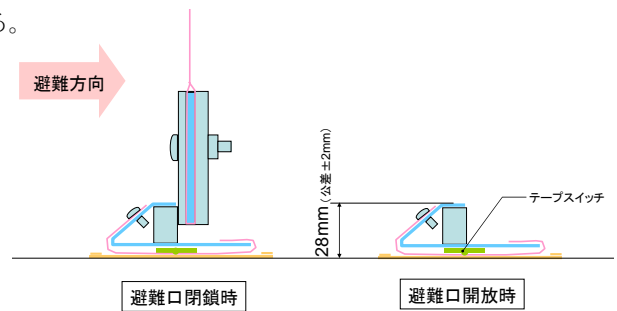


Fig. 12 スクリーンドア座板部の垂直断面図
Vertical Section of the Bottom of Screen-door

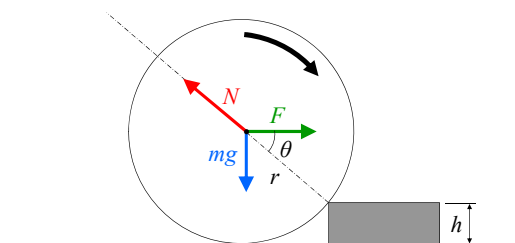
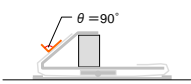
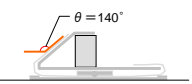


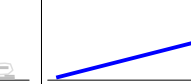







Fig. 13 車輪が段差を乗り越える場合の力のつりあい
Force Diagram when a Wheel gets over the Difference

Table 7 車いすの通過性能を向上させるための試作品一覧
Prototypes of Attachment in Order for a Wheelchair to Easily Pass through Screen-door

タイプ	A	B	C	D	E
断面形状					
取付状況					
備考	<ul style="list-style-type: none"> ・つめ長さ5mmで性能検証 ・材質はステンレス(厚さ1.5mm) 	<ul style="list-style-type: none"> ・つめ長さは15mmで性能検証 ・上面にすべり止めテープを貼り付け ・材質はステンレス(厚さ1.5mm) 	<ul style="list-style-type: none"> ・スクリーン部と同じシリカクロス(厚さ0.7mm)を使用 ・内部の丸パイプの材質はアルミ,あるいはステンレス 	<ul style="list-style-type: none"> ・材質はステンレス及びアルミ ・座板着床時に自動的に展開 ・巻き上げ時は手で折りたたむ 	<ul style="list-style-type: none"> ・材質はアルミ ・座板着床時に自動的に展開 ・巻き上げ時は手で折りたたむ

通過性能の評価は①車いすで座板を乗り越える際の通過時間, ②被験者による「通過しやすさ」の主観評価, ③身体負荷(表面筋電位, 運動により生じる加速度)の3項目について行った。



(a) 通過時間計測開始 (b) 通過時間計測終了

Photo 5 車いす通過時間の測定
Measurement of Pass-through Time

5.3.2 通過時間 車いすが座板を乗り越える際の通過時間をストップウォッチで計測した。通過時間は, 車いすに乗った被験者が座板手前に前輪をつけてハンドリムを持った状態で待機し, 合図とともにスクリーンドアを通過した時の, 合図から後輪が通過するまでの時間とした(Photo 5参照)。

5.3.3 主観評価 スクリーンドアを通過する度に, 被験者は「通過しやすさ」について7段階(①非常に通過しにくい, ②通過しにくい, ③比較的通過しにくい, ④ふつう, ⑤比較的通過しやすい, ⑥通過しやすい, ⑦非常に通過しやすい)で自己申告した。

5.3.4 身体負荷 身体負荷の指標として, 表面筋電位(EMG: Electromyography)を用いた。車いすに座った状態の被験者の計測対象筋肉に装着した筋電センサ(追坂電子機器製)と, 被験者の胸部に固定したワイヤレスEMGロガー(Logical Product製)により, 表面筋電位を測定した。計測対象筋肉は, 車いす駆動時の筋負荷測定に関する既往文献⁸⁾を参考に, 三角筋肩甲棘部(腕を引き上げる動作において負荷がかかる筋肉)とした。

5.3.5 実験条件 実験は対策ありの5タイプ(A~E)と対策なし(N)の合計6タイプとした。1セッションでは

6タイプを順次交代し, 1タイプにつき3回繰り返し測定した。1セッション終了後に休憩やインターバルを設け, 合計4セッション行った。実験回数は, 対策ありの5タイプ(A~E)を各12回, 対策なし(N)を15回, 合計75回行った。なお, 各タイプの実験順序は被験者の慣れによる順序効果を考慮し, セッション毎に変更した。

5.4 実験結果

各タイプにおける平均通過時間と「通過しやすさ」に関する平均評価値の比較をFig. 14, Fig. 15に示す。図中に一元配置の分散分析(反復測定)により平均値に有意な差があるものを*印で示している。通過時間の平均値はE<D<B<C<N<Aの順で短くなり, 「通過しやすさ」はE>D>C>B>N>Aの順で通過しやすい結果となった。つまり, いずれの評価項目もEタイプの試験体が最も通過しやすい評価となった。一方, Aタイプについては対策なしのNタイプと比べて通過性能が悪化した。

表面筋電位については各タイプにおいて通過時間と「通過しやすさ」が中央値をとる実験ケースについて表面筋電位のピーク値を抽出し, 比較を行った。Table 8に各計測項目における通過性能の順位を示す。表面筋電位のピーク値は通過性能が良くなる程, 小さくなる傾向がある。

5.5 試作品の改良

被験者実験において最も評価が高かったEタイプの試作品についてユニバーサルデザインの有識者等からの意見を参考に改良を加えた。被験者実験に用いた試作品は車いすの車輪部分のみスロープ板を設けていたが, スクリーンドアに対する進入角度によっては車いす前輪がスロープ端部に乗り上げる場合がある。そこで, Photo 6に示すようにスロープ板の幅をスクリーンドア幅よりも大きくし, スロープの両端部はアールを付けて端部からの進入に対してもスムーズに車いすの前輪が通り抜けられるように改善した。なお, このスロープ板については天井収納時にはスクリーン側にはね上がった状態となり,

座板が着床した時点で床面側に展開する機構を検討中である。

6. まとめ

耐熱ガラスクロスを火災時の延焼・煙拡散防止のための区画部材として利用するためにこれまで行ってきた一連の技術開発を紹介した。火災時のみ閉鎖する常時開放型の防火設備としては、これまで鋼製の防火シャッターが用いられてきたが、耐熱ガラスクロスはシャッターのスラットに使われている鋼板よりも軽量で柔軟性があり、また1200℃の雰囲気中に曝されても熔融、あるいは著しい強度低下のない優れた耐熱性能を有する材料である。従って、将来的には建築物の防火設備だけではなく、道路トンネルなどの土木構造物における延焼防止技術にも活用されていくものと考えられる。但し、極端に圧力差が生じた場合の区画保持性能や屋外で使用する場合の耐候性の問題、さらには製造コストが高いことなど、解決すべき課題は残っており、今後も継続的に技術改良を行う必要がある。

また、耐熱ガラスクロスは開発当初より、軽量化が図れる区画材料として適用を推し進めてきたが、建築基準法に規定された防火設備としての性能を満足させるために座板重量が次第に増加する結果となり、現在の認定品の総重量は当初目標としていた製品重量よりも極端に大きくなっている。製品の軽量化は作動時の危害防止性能向上の観点から重要な課題であり、将来的にはクロスの利点が最大限に生かせるフレキシブルで軽量の延焼防止システム(例えば、のれん型の耐火スクリーンなど)が適用できるように新たな性能評価基準が検討されることを望みたい。

参考文献

- 1) 村岡宏 他: ウェットスクリーンを用いた防排煙システムの概要と性能評価 ～超高層オフィスビルにおける設計事例～, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, pp. 653～656 (2000)
- 2) 村岡宏 他: ウォークスルー型耐火スクリーンの開発, 大林組技術研究所報, No52, pp. 105～108 (1996)
- 3) 本間正彦 他: ウォークスルー型耐火スクリーン(ソフトファイアガード)の開発(その2), 大林組技術研究所報, No56, pp. 121～124, (1998)
- 4) (社)日本シャッター・ドア協会: 耐火クロス製防火・防煙スクリーン技術標準及び関係基準等, (2004)
- 5) 村岡宏 他: コーナー部にポストが不要な耐火スクリーンーコーナージョイントスクリーンー, 大林組技術研究所報, No70, (1998)
- 6) 天野玲子 他: 地下空間のための水幕式火災防災システム, 日本火災学会研究発表会概要集, pp224-227, (2003)

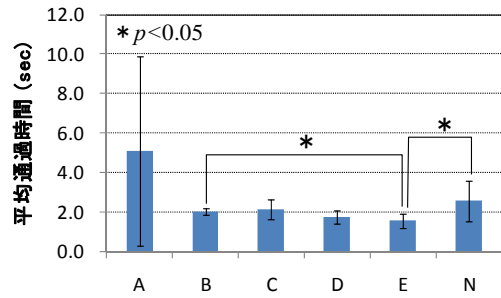


Fig. 14 平均通過時間の比較

Comparison of Mean Pass-through Time

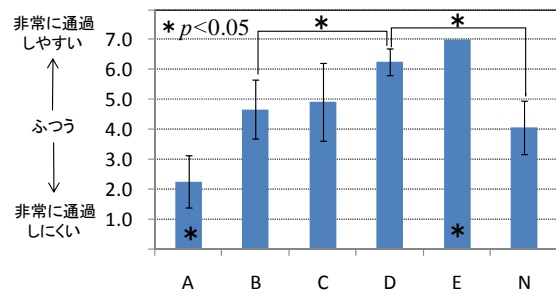


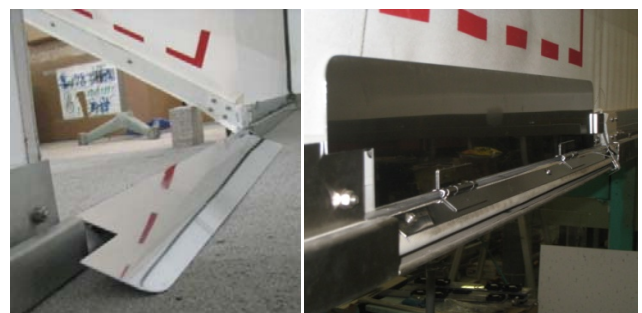
Fig. 15 「通過しやすさ」に関する評価値の比較

Comparison of Evaluation Value on "Easy Pass-through"

Table 8 各計測項目における通過性能の順位

Rank of Performance on "Easy Pass-through"

計測項目	通過性能順位 (良 → 悪)					
	1	2	3	4	5	6
通過時間 (秒)	E (1.56)	D (1.74)	B (2.03)	C (2.14)	N (2.55)	A (5.09)
通過しやすさ (評価値)	E (7.0)	D (6.25)	C (4.92)	B (4.67)	N (4.07)	A (2.25)
表面筋電位ピーク値 (V)	D (2.72)	E (2.89)	B (3.06)	C (3.08)	N (3.11)	A (3.36)



(a)座板着床時のスロープ板 (b)天井収納時のスロープ板

Photo 6 Eタイプ試作品の改良

Improvement of Prototype E

- 7) 日本建築学会: 建築物の火災安全設計指針(2002)
- 8) 中村一美 他: 車椅子駆動時の腰背部における筋負荷の定量的評価, 近畿大学工学部研究報告No. 41, pp. 137-140, (2007)