

実火災加熱条件下における
防火ガラス部材の消防用ホース放水時の挙動に関する共同研究
実験結果報告書

平成18年2月7日

独立行政法人消防研究所
国立大学法人東京大学
日本電気硝子株式会社
株式会社イー・アール・エス
東京消防庁消防科学研究所

目 次

1. 目的と内容
2. 基本方針
 - 2.1 研究体制と役割分担
 - 2.2 実験安全の確保基準
 - 2.3 研究実施の概略と目的
3. 実験のシナリオ
 - 3.1 各種防火ガラスの特徴
 - 3.2 想定されるガラスの熱・物理的衝撃破壊メカニズム
 - 3.3 想定する火災シナリオ
 - 3.4 ホース放水の方法とタイミング
4. 事前準備
 - 4.1 防火ガラスの熱応力分布の解析
 - 4.2 ファイアライトの耐消防用ホース放水圧性能確認実験（事前実験1）
 - 4.3 ホース放水の代案としての水球衝突試験法に関する基礎検討（事前実験1）
 - 4.4 「防火ガラス上部付近の非加熱側上昇（500℃程度）」達成のための火災シナリオ抽出実験（事前実験2）
 - 4.5 防火ガラスの高温時特性把握実験（事前実験3）
5. 実験
 - 5.1 実験方法
 - 1) 実験装置
 - 2) 試験体の種類と形状
 - 3) 模擬火源と配置、助燃剤の量、区画及び開口部位置
 - 4) 消防用ホース放水の代案として使用した水球
 - 5) 計測項目と方法
 - 5.2 実験結果
 - 1) 防火ガラスの実験観察結果
 - 2) 実験空間内外の温度性状
 - 5.3 考察
 - 1) 実加熱した防火ガラスの非加熱側への水球衝突による破壊状況の分析
 - 2) 防火ガラスの特性を考慮した適材適所の設計
6. 消防活動の安全性から見た防火ガラス
 - 6.1 ガラス防火戸が存する防火区画について
 - 6.2 2005年6月の燃焼実験について
 - 6.3 防火ガラスの使用方法等について
7. 今後の課題
 - 7.1 技術的な課題
 - 7.2 施策的な課題

8. 付録

付録1. 防耐火ガラスの比較表

付録2. 防火ガラスの物理強化と機械的強度について

付録3. 防火ガラスの高温特性把握実験についての冶具の比較実験

付録4. 防火ガラスの高温特性把握実験についての加熱実験

(研究体制)

本報告書は、以下の体制で実施した事前準備と平成16年度及び17年度に実施した実験の結果をまとめたものである。

(平成16年度研究)

独立行政法人消防研究所	鶴田 俊
	尾川 義雄
国立大学法人東京大学	野口 貴文
	田村 政道
	劉 高育
	三木めぐみ
日本電気硝子株式会社	石井 進
	橋部 吉夫
	澤田 正弘
	山地 道雄
	辻本 弘行
株式会社イー・アール・エス	佐藤 博臣

(平成17年度研究)

独立行政法人消防研究所	鶴田 俊
	尾川 義雄
国立大学法人東京大学	野口 貴文
	田村 政道
	劉 高育
日本電気硝子株式会社	石井 進
	橋部 吉夫
	澤田 正弘
	辻本 弘行
株式会社イー・アール・エス	佐藤 博臣
東京消防庁消防科学研究所	田村 裕之
	千葉 博
	佐藤 衛寿
	湯浅 弘章
	細谷 昌右
	森永 健治

1. 目的と内容

現在複数メーカーの防火ガラス部材が、特定防火設備として市場に出回っている。これらは、国土交通省が定める性能評価試験方法に従って耐火試験炉で標準加熱曲線に沿った一様な加熱を1時間与え、非加熱側に火炎を通過させない（遮炎性）ことを条件に合格したものである。

しかし消防隊が消火・救助活動を行う実際の火災条件下では現場到着のタイミングによって、火災進展の状況は局部的な燃焼状態から全体に発展した火災盛期までさまざまである。どのような燃焼状況であれ、消防隊が室内側から火災空間に突入しようとする場合には、一般にこれら部材などで構成される開口部のうち扉部分をホース放水することで冷却して突入することが想定される。

このときにホース放水による水圧（物理的な衝撃）や加熱面と非加熱面の温度差など熱的な衝撃によって上記試験に合格した防火ガラスであっても破壊する可能性が懸念される。その結果、予想以上に広範囲に防火区画（遮炎性）としての機能を維持できなくなるばかりか、ガラス破片や熱気流などで消防隊などにも被害を及ぼすことが懸念される。

本研究は、これら現状の試験方法における火災室内が比較的均一な温度分布となった状態のみを想定した火災盛期を対象とした標準加熱条件下だけではなく、空間の高さ方向に温度分布がある加熱およびすすをとまなう加熱など「より実火災に近い」状態を模擬した燃焼空間環境を創生し、「そのような状況下で、これら認定された防火ガラス部材がどのような挙動（破損などの発生）を示すか、あわせて消防用ホースによる放水に対してこれらの部材がどのような挙動を示すかを観察・計測し」、かかる防火対象についての消防活動上の留意点に関する資料ならびにそれぞれのガラスの特徴に基づく適材・適所の設計を行うための資料を得ることを目的とする。

2. 基本方針

2.1 研究体制と役割分担

本共同研究（平成 16 年度分）は、独立行政法人消防研究所、国立大学法人東京大学、日本電気硝子株式会社の三者で実施した。研究目的・役割分担などについては共同研究契約書によった。

なお本研究は、日本電気硝子株式会社と別途契約による（株）イー・アール・エスの助言によって進めた。

本共同研究（平成 17 年度分）は、防火ガラスが消防活動の安全性に及ぼす影響についても検討するため、独立行政法人消防研究所と東京消防庁消防科学研究所が締結した共同研究契約に基づき、平成 16 年度の体制に東京消防庁消防科学研究所が参画し、四者により実施した。

2.2 実験安全の確保基準

本実験では、条件によってはガラスの広範囲な飛散が懸念されることから特に実験関係者は消防研究所の実験安全基準を遵守することが基本的な要件である。

また、本実験を安全に遂行するために、事前あるいは並行して行われる東京大学や日本電気硝子株式会社での小規模実験などの結果を反映させ、本件独自の安全対策を追加準備した。

さらにコンピュータシミュレーション解析によって熱的な衝撃によるガラス破壊性状などをできるだけ事前に予測して一層の安全を期した。

2.3 研究実施の概略と目的

本研究に関する要因は図 1 に示すとおりである。

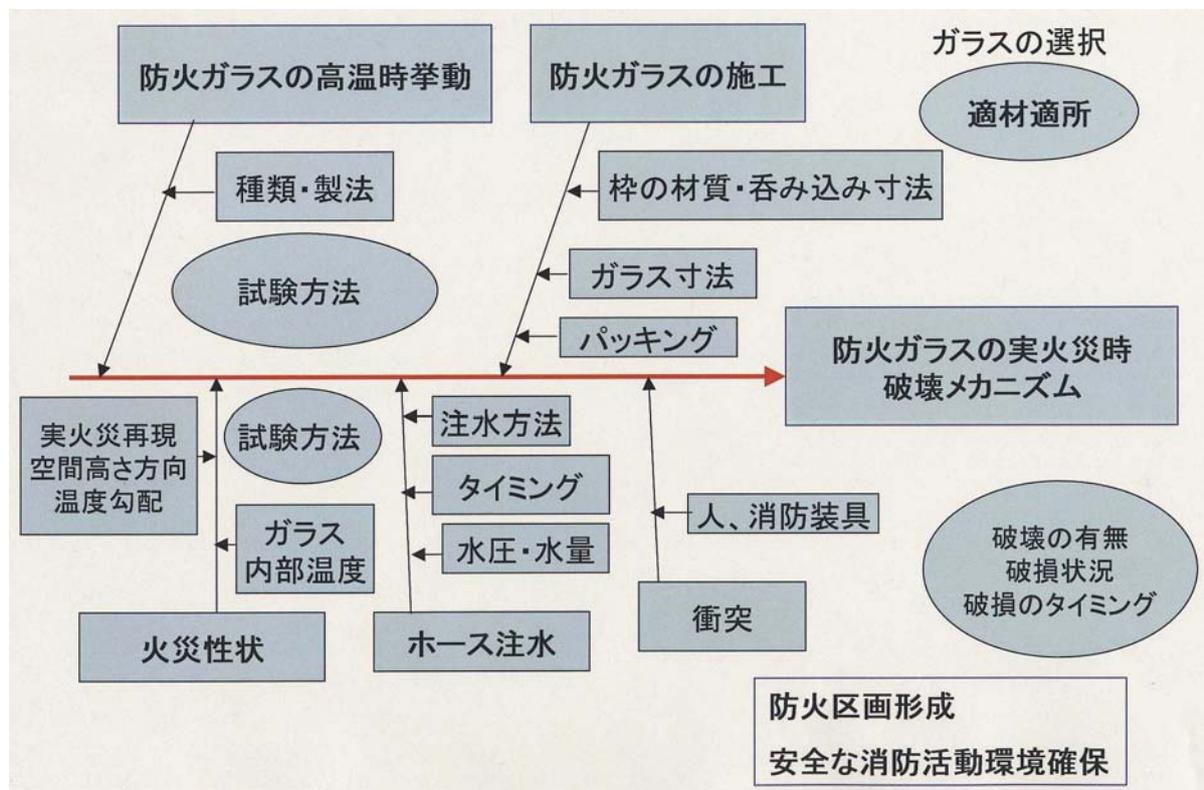


図 1 本研究に関連する要因

3. 実験のシナリオ

3.1 各種防火ガラスの特徴

表1に示すような各種防火ガラスがそれぞれの特徴を活かして市場に出回っている。今回、研究対象とする防火ガラスは、熱的な衝撃に耐えるために何らかの強化対策を施している下記4種類のガラスで、その特性は表2のように整理できる。

表1
防火ガラス比較一覧

会社名	日本電気硝子 耐熱結晶化ガラス	旭硝子 性能強化防火ガラス	日本板硝子 耐熱強化ガラス	旭硝子、日本板硝子、セントラル硝子 網入磨き板ガラス、網入型板ガラス
一般名	ファイアライト	ピラン	パロクリア	ピソフイヤー、クロスフイヤー(旭硝子) 磨きフイヤー、クロスフイヤー(日本板硝子) 磨きフイヤー、網入型フイヤー(セントラル硝子)
商品名	リチウムアルミナ珪酸系	ほろ珪酸系	ソーダ石灰系	ソーダ石灰系
素板の厚み	-6	32	88	88
熱特性	熱膨張率 ($\times 10^{-7}/K$) 約900°C以上	約810°C	約720°C	約720°C
熱伝導率 (W/mK)・25°C	1.5	1.0	0.9	0.9
可視光線透過率 (%)	87	92	88	82
光特性	5mm 6.5mm 6.8mm 8mm 10mm		88	79 1.52
屈折率 (n)	1.54	1.49	1.52	
物理特性	耐風圧強度 3400	10000		4400
許容荷重 (N)	6.5mm 6.8mm 8mm 10mm		25000以上	8400
比重	2.51	2.2	2.5	2.5
ヤング率 (GPa)	88	62	72	72
モース硬度	約7	約6	約6.5	約6
最大寸法 (mm)	5mm 6.5mm 6.8mm 8mm 10mm	2000×3000	2000×2400 2000×3000	2400×2400且つ4.8m以下(防火設備) 3000×3000且つ7.2m以下(防火設備)
主要板厚	5ミリ・8ミリ	6.5ミリ	6.5ミリ・8ミリ	6.8ミリ・10ミリ
エッジ加工の必要性	無し	有り	有り	無し
ガラスの色調	薄い琥珀色	ソーダライムより青みが少ない	フロートガラスと同等	フロートガラス同等
反射映像	磨き板ガラス程度	強化ガラス程度	強化ガラス程度	磨き板ガラス程度
現場での切断加工	○	x	x	○
破砕形状	フロートガラス同等(放射状)	フロートガラス同等(放射状)	強化ガラス同等(粒状)	フロートガラス同等(飛散防止機能有)

・データの数値は各社カタログ参考値より抜粋。

表2 今回の実験に用いた防火ガラスの概略組成と特性

防火ガラスの組成と特性

商品名 販売元	ファイアライト 日本電気硝子	ピラン 旭硝子	パイロクリア 日本板硝子	クロスワイヤ 旭硝子
ガラス組成(概略)				
SiO ₂	67	80	71	71
Al ₂ O ₃	23	2	1	1
B ₂ O ₃		13		
CaO			10	10
MgO			3	3
Li ₂ O	4			
Na ₂ O		4	14	14
K ₂ O		1	1	1
TiO ₂	2			
ZrO ₂	2			
その他	2			
ガラス系	結晶化ガラス	非晶質ガラス	非晶質ガラス	非晶質ガラス
ガラス特性				
膨張係数 x10 ⁻⁷ /°C(～380°C)	-6	32	88	88
x10 ⁻⁷ /°C(～750°C)	-3	測定不可	測定不可	測定不可
転移点(°C)	850	540	550	550
屈伏点(°C)	測定不可	610	600	600
比熱 J/g・K	0.7	0.7	0.8	0.8
熱伝導率 W/m・K	1.5	1.0	0.9	0.9
密度 g/cm ³	2.51	2.2	2.5	2.5
ヤング率 GPa	88	62	72	72
ポアソン比	0.24	0.19	0.23	0.23
平均破壊応力 MPa	50～60	100～150	200～250	50～55
歪点 °C		約520	約510	約510
徐冷点 °C		約560	約550	約550
軟化点 °C	900以上	約810	約720	約720
可視光透過率 %(厚み)	87(5)	92(6.5)	88(8)	82(6.8)
ガラス品種	耐熱結晶化ガラス	低膨張防火ガラス	耐熱強化ガラス	網入りガラス

膨張係数(転移点・屈伏点): DILATO法
 比熱・熱伝導率: レーザーフラッシュ法
 ヤング率・ポアソン比: 超音波法
 歪点・徐冷点・軟化点: ファイバーエロンゲーション法
 可視光透過率: 分光光度計

我が国では、点火1時間後に945℃に達する一様な標準加熱試験に合格したものはすべて遮炎性を有する特定防火設備として使用できる。そのため、この試験に合格することを第一目標としてコストを配慮しつつガラスの熱的な弱点を補う商品開発が行われている。

消火・救助活動を考えなければ、一定の時間出火室の火炎を遮断して非火災室に貫通させない機能を区画部材に要求することは必要なことである。コンクリートや鋼板などの従来の一般的な区画部材は非加熱側に消防隊がホース放水しても破壊することはなかったのでこの機能だけを評価すれば十分であった。

表1及び表2に示した耐熱結晶化ガラス（ファイアライト）、低膨張防火ガラス（ピラン）、耐熱強化ガラス（パイロクリア）、網入りガラス（クロスワイア）について、風冷による強化ガラスは低膨張防火ガラスと耐熱強化ガラスである。低膨張防火ガラスには強化により、表面には約150MPa、耐熱強化ガラスには約250MPaの圧縮応力が施されている。その結果、機械的強度（許容応力）は、それぞれ100MPa以上、200MPa以上を示す。

一方、耐熱結晶化ガラスと網入りガラスは強化加工が施されていないために、通常のガラスと同様の強度（約50MPa）である。これらの許容応力は常温に於ける値であり、強化を施す事により2～4倍の強度を持つ。しかしながら、強化による表面圧縮応力はそれぞれのガラスの歪点温度に暴露されると、その圧縮応力は解除され通常の強度に戻る。

また、火災などの不均一な加熱によって発生する熱応力は、それぞれのガラス特性、特に熱膨張係数の影響によって大きく異なり、許容応力を超える事によりガラス破損の発生につながる。

3.2 想定されるガラスの熱・物理的衝撃破壊メカニズム

しかし、壁や扉部分に防火ガラスが多様な形態で使用されるようになった今日では、消防隊が火災のどの段階に現場到着するかにもよるが、室内側から火災室へ侵入しようとするとき、第一に従来の鋼板ドアの場合と同様に防火ガラスドア面や枠材を放水・冷却するのが一般的な戦術であろう。

このとき、ガラス面は消防隊到着の速遅による火災の進展状況によって、例えば火災の成長期では高さ方向に一様な加熱を受けていない（上部から下部に向かって何らかの温度勾配を持つ）状態や火災室全室が盛期火災に発展し上下の温度差が比較的小さくなっている場合などさまざまな温度履歴の場があり、この温度履歴場と消防放水による局部的あるいは全面的な冷却による三次元的な熱衝撃（枠材の拘束条件を含め）や物理的な衝撃が破壊の主たる原因となろう。

また、燃焼物によっては煙やすすを多く生成するもの、ガラス面と燃焼物の位置関係によっては強い放射を受けるスポットなども生じ、これが破壊の原因となることも懸念される。

以上、火災時にガラスと枠材が被る空間の高さ方向の温度差、ガラスの厚さ方向の温度差、局部的な温度ギャップなどが破壊の原因となる。これらは、当然ガラス部材が被る火災の温度と時間だけではなく、ガラスの取付け方、ガラス寸法・厚さなどの因子、枠材の熱挙動などにも左右される可能性は無視できない。

防火区画の早期破壊による火災延焼被害範囲の増大は多少止むを得ないとしても、ガラスの破損によって避難者や消防隊員の死傷原因となることは絶対避けるべき課題である。ガラスの飛散範囲が狭く、飛散速度が小さければ、またガラス片がシャープでなければ、人的な被害は比較的軽微なものとなる可能性はあり、本研究では各種ガラスの破損状況を知ることでも今ひとつのテーマである。

3.3 想定する火災シナリオ

前述のように防火ガラスがどのような温度履歴状態にあるかと放水のタイミングによって、ガラスの破損は左右される。

網入りガラスを除き、防火ガラスの特性から考えるとガラスの内部温度が 500°C以上を確保しなければ、ピランやパイロクリアを破壊させるような、ガラスの厚さ方向や高さ方向の急激な温度勾配は得ることはできない。

一方、今回の実験装置は、消火実験や家具などの燃焼実験に用いるために準備されたものであるため、盛期火災時に室内外のガラス厚さ方向の温度差は最大になるが、この装置では盛期火災を再現することはできない。そこで、火災成長期にガラス面の高さ方向上下に急激な温度勾配が発生することに着目して、この装置で作り出せる最大規模の成長期火災を用意することとした。

一般の火災は木質材料の燃焼が多いことに鑑み、消火用実験に供する 2 号クリブを 2 段積み（模擬火源と呼ぶ）して基本的な燃焼状況を再現あるものとし、実験空間の規模や助燃材量などを変数として、ガラス内部温度 500°C以上達成の条件抽出を目的とする事前実験 2 によって決定することとした。

このとき、ガラス部材と模擬火源の位置関係も重要な条件となる。これについても上記実験で確かめた。

3.4 ホース放水の方法とタイミング

ホース放水による消火活動の水圧（物理的な衝撃）で平常時使用状態の防火ガラスが破損しないことをまず確認する必要がある。ファイアライトが今回研究対象とする防火ガラスの中では物理的な衝撃に弱点をもち、人や物品の衝突可能性のある個所には飛散防止フィルムを貼る仕様が一般であることから、この材料について実験することとした。事前実験 1 によって対象とするガラスのホース放水による破損はないことを確認できた。

消防隊が実際の現場でどのような放水方法をとるかは定めがたい。しかし、水の掛かり具合や場所など弱点部に若干の水が接触しても破損する可能性があるため、破壊のモードが変化する可能性のあることは容易に推察される。たくさんの実験回数を行えば、共通するモードを見つけることは可能であるが、費用的な問題もあり、今回はあらかじめコンピュータシミュレーションで弱点部を推察し、その部分周辺に水を封入したゴム風船などを適当な高さから衝突させる方法を採用し、ホース放水による熱衝撃発生個所などのばらつきを消去することとした。事前実験によってポリエチレンフィルム（約 0.01mm厚さ、サランラップ）で作製した一定水量の水袋を衝突させた。予備実験の段階ではこの知見に基づいて防火ガラス間の性能比較を行った。

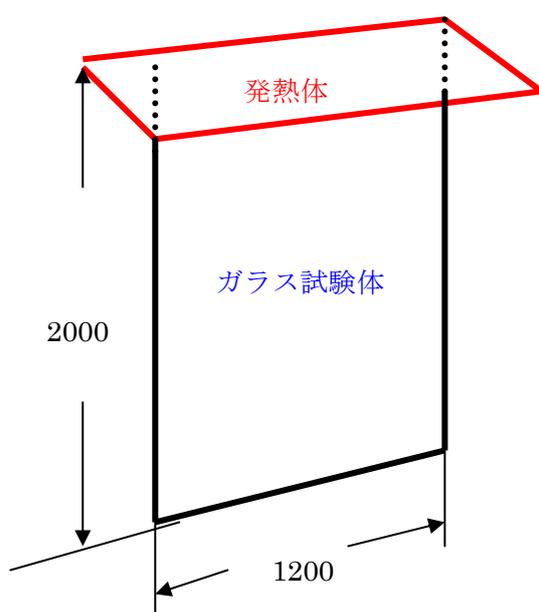
4. 事前準備

4.1 防火ガラスの熱応力分布の解析

シミュレーションによる輻射伝熱解析の結果を示す。

以下に、解析条件と図1に加熱モデルを明記した。

- ・ 解析ソフト: ANSYS (構造解析)
- ・ 防火ガラスのサイズ: W1200mm × H2000mm
 - 耐熱結晶化ガラス : 5mm厚 低膨張防火ガラス : 6.5mm厚 耐熱強化ガラス : 8mm厚
- ・ 強化ガラスの風冷強化による表面圧縮応力は考慮しない
- ・ 拘束条件 ⇒ 4辺拘束



- ・ ガラス部材の最上端の温度が約500°Cに加熱されるように発熱体の形状と発熱量を設定。火炎が天井に当たり、開口部のガラス部材の最上端部が最高温度になることを想定
- ・ 得られた温度分布を元にガラス特性(ヤング率・ポアソン比・熱膨張係数・熱伝導率等)を用いて発生応力を算出。
- ・ 放水側(非加熱)の引張り応力を表示。

図1 加熱モデル

図1の加熱モデルによって輻射伝熱解析を行った結果、上端部を500°Cに加熱することにより図2に示すような温度分布となり、非加熱面側は加熱面側より約100°C低くなる。又、放水によりガラス面は約75°Cに冷却される結果を示した。更に、表1に3種類の防火ガラスが500°Cに加熱された場合の発生そり量を比較した。各ガラスの膨張係数に依存しており、耐熱強化ガラスについては4辺フリー時には約20mm反る事になった。

以上の条件から、実火災実験を行うにあたり耐熱結晶化ガラス、低膨張防火ガラス、耐熱強化ガラスの3種について発生する応力を想定した結果を図3にまとめた。この結果は、500°Cに加熱した場合の非加熱面側発生応力と非加熱側を全面放水した場合の発生応力を示した。

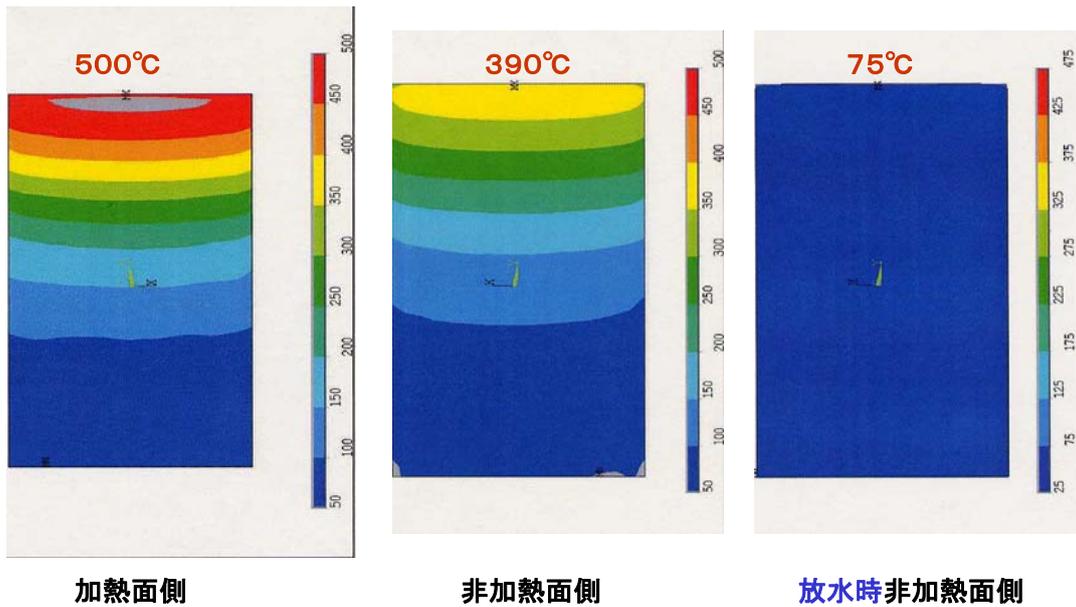


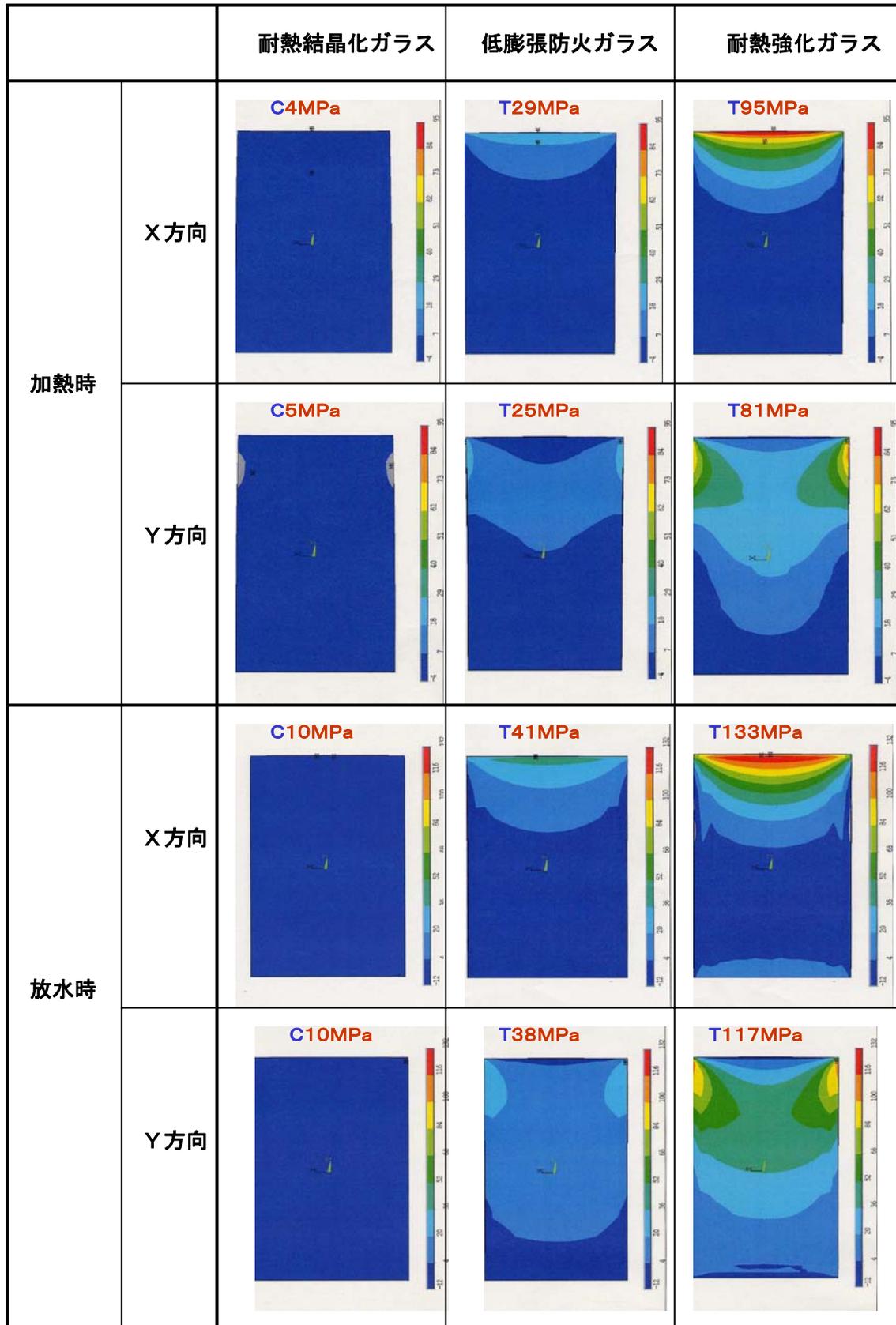
図2 加熱及び放水時のガラス温度分布と最高発生温度
(耐熱結晶化ガラスによる)

表1 500°C加熱時のガラスの反り
(4辺拘束)

防火ガラス	厚みmm	*反りmm	反り方向
耐熱結晶化ガラス	5.0	0.7 (2)	加熱面側に 凹
低膨張防火ガラス	6.5	2.9 (11)	加熱面側に 凸
耐熱強化ガラス	8.0	5.6 (20)	加熱面側に 凸

(4辺フリーの場合)

*反り:Z方向の最大変位置(mm)



C : 圧縮応力 T : 引張り応力

図3 非加熱面側の発生応力分布と最大発生応力値

4.2 ファイアライトの耐消防用ホース放水圧性能確認実験（事前実験 1）

平成 16 年 10 月 13 日に標準的な寸法かつ施工状況のファイアライトが、1 線 2 本延長による消防車用消防ホースによる放水圧（水量 150-600L/分、元圧 0.5-1.3MPa）で破壊しないことを日本電気硝子（株） 大津事業場内にて同事業場自衛消防隊の協力のもと本研究関係者立会いにより確認した。

ホース放水は 2 ケース実施した。放水で狙った的の位置はガラス面の中央と同じ高さの枠材を含む端部である。筒先は両ケースともガラス面から 6 m 離れた位置とし、最もノズルを絞った状態で放水した。設定した圧力は元圧で 0.5MPa から 1.3MPa まで上昇させた。その結果最大の実験条件（放水圧 1.2MPa）でも、このガラスは最大ホース放水圧では破損しないことが確認できた。実験状況については、以下に示すとおりである。

ファイアライトの耐放水試験



4.3 ホース放水の代案としての水球衝突試験法に関する基礎検討（事前実験 1）

また片面を電気炉にて ISO 加熱曲線にしたがって 600℃程度まで加熱し、非加熱側の温度が接触型温度計で 350℃になることを確認したファイアライトに一定量の水を封入したポリエチレンフィルム袋を衝突させ、加熱したガラスとの接触により袋が割れてガラス面を水で一定範囲濡らすことができるかの確認を行った。水を封入したゴム風船も試したが同様な方法で加熱したガラスに衝突させても跳ね返って一度の衝突では割れなかった。結果としては、ポリエチレンフィルムで適量の水を封入するのが最良の選択であると判断した。実験条件や方法・結果などは、以下の通りである。

水球の破壊実験

目的 ホース放水の代案としての水球に使用する材質についての破壊実験
 実施日 平成 16 年 10 月 13 日
 実施場所 日本電気硝子（株）大津事業場・技術部防火耐火実験室
 判定 ガラス表面に振り子式自然落下させ、一度ぶつかった段階で水球が破壊したかを判定する。

表 1 実験結果

材質 \ 温度 (°C)	350	400	450
ゴム風船（ヨーヨ）	×	×	×
ゴム風船（中型）	×	×	×
ゴム風船（大型）	×	×	×
ポリエチレンフィルム	○	○	

○：破壊する

×：破壊せず

ゴム風船の水量：200cc

温度：ガラスの表面温度（非加熱面側）

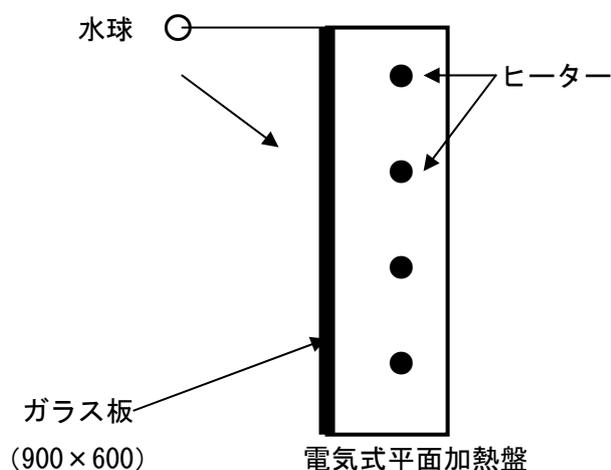


図 1 実験方法

4.4 「防火ガラス上部付近の非加熱側上昇（500℃程度）」達成のための火災シナリオ抽出実験 (事前実験 2)

消防研究所総合消火研究棟主実験場内の実験区画（床面積約 6 m×6 m、天井高さ 2.3m）を珪酸カルシウム製の板で仕切り、実験に用いる床面積を 4 m×4 m としたものを実験装置とした。（図 1）。

この実験装置の所定位置にファイアライトを設置した状態で、

- ・ 区画開口部位置（装置の北側または西側開口）、
- ・ 模擬火源（2号クリブ2段積み、助燃剤ヘプタン）の位置（3箇所）、
- ・ 助燃剤（ヘプタン）の量（1.5リットル、3リットル）

などの条件を変化させた。

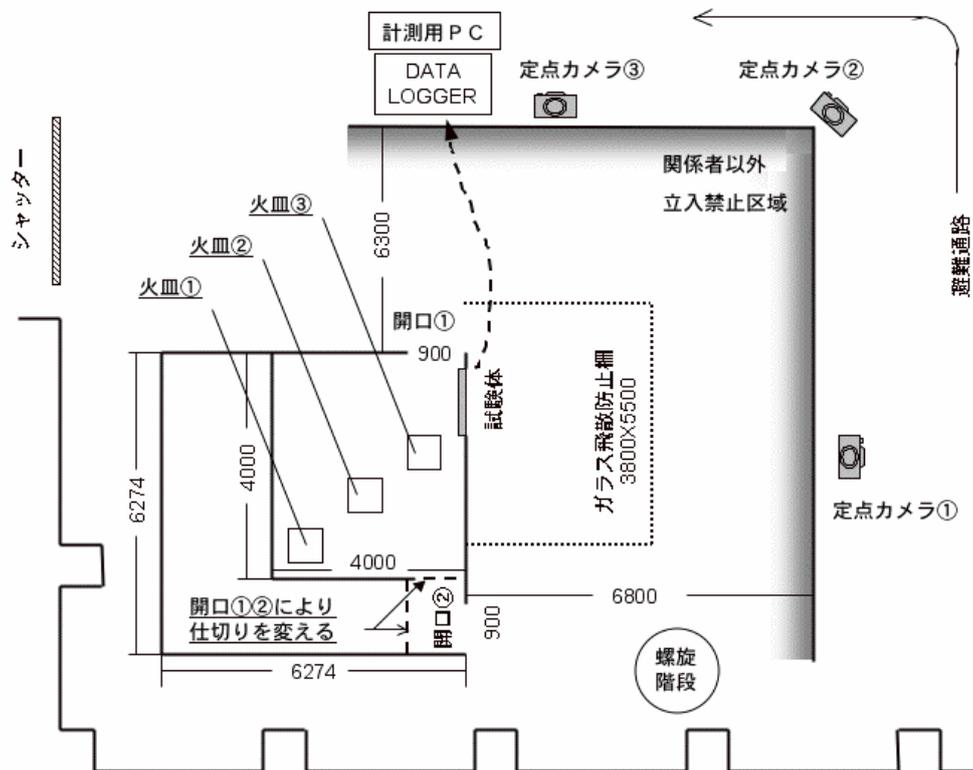


図 1 実験区画の見取り図

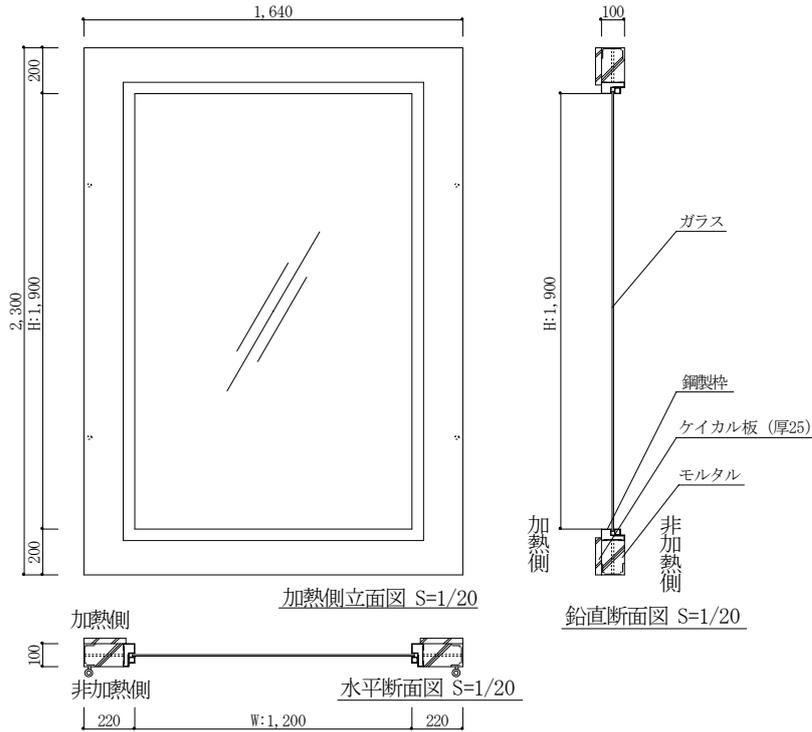


図2 ガラス試験体図面

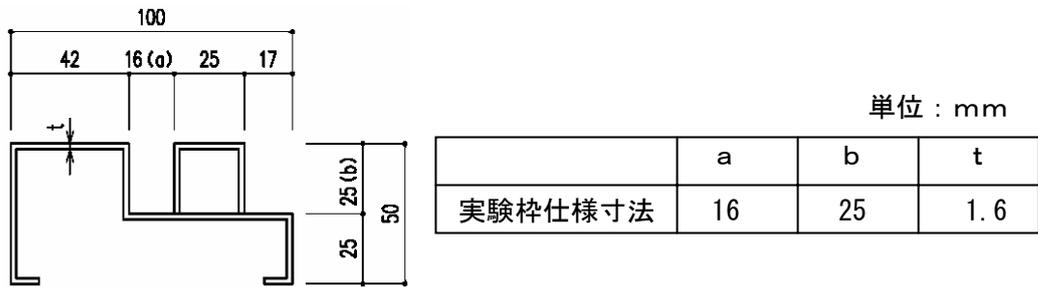
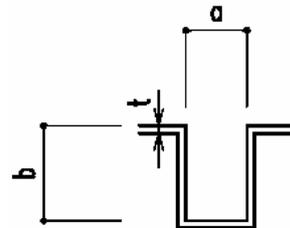


図3 実験に用いた枠体詳細図（上枠、下枠、堅枠共通）

枠体仕様寸法を決定するに当たり、各種防火ガラスの嵌め殺し枠使用寸法を参考にし、枠のガラスへの影響を考慮して最大値を採用する。

単位：mm

	a	b	t
耐熱結晶化ガラス（厚み5）	15	20	1.6
低膨張防火ガラス（厚み6.5）	14	25	1.6
耐熱強化ガラス（厚み8）	16	25	1.6
網入りガラス（厚み6.8）	16	25	1.6



上枠、下枠、堅枠共通

図4 防火ガラス嵌め殺し枠の仕様寸法（各社が特定防火設備試験に使用した代表的枠）

温度の計測は、火災室内の温度分布は区画内に7箇所ポールを立て、そのポールの上下5箇所
に熱電対を配置して測定した。設置位置は図2に示した。平面図の丸数字がポール位置、立面図
A～Eが天井からの設置位置を示している。ポール位置③および④は高さ方向Aの位置にガラス
が無い
ため計測対象からは外したため計測は合計33点で行った。ガラスの非加熱面側表面温度は、
ガラス用接触型温度計および赤外線カメラ（NEC 三栄株式会社製 TH3100 および TH7102MX）
を用いて測定した。

使用する模擬火災は、実際の火災を模擬するものであることが必要である。液体可燃物の燃焼
や、非常に高い温度を発するような危険物の燃焼は除き、ここでは木材クリブを使用した。火災
時の可燃物がすべて木材であるとは限らないが、一般的な火災の一例として考えて問題ないこと、
燃焼性状が安定しており比較的再現性が良いこと、発熱量が分かっていることなどから採用した。
火災規模は消火器の能力検定で用いられる木材クリブの第2模型を縦に2段積みにしたものを用
いた。木材クリブの位置は、図2の試験体と第1開口部のある左下から右上に縦横方向3m（火
皿1）、2m（火皿2）、または1.5m（火皿3）の位置を設定した。

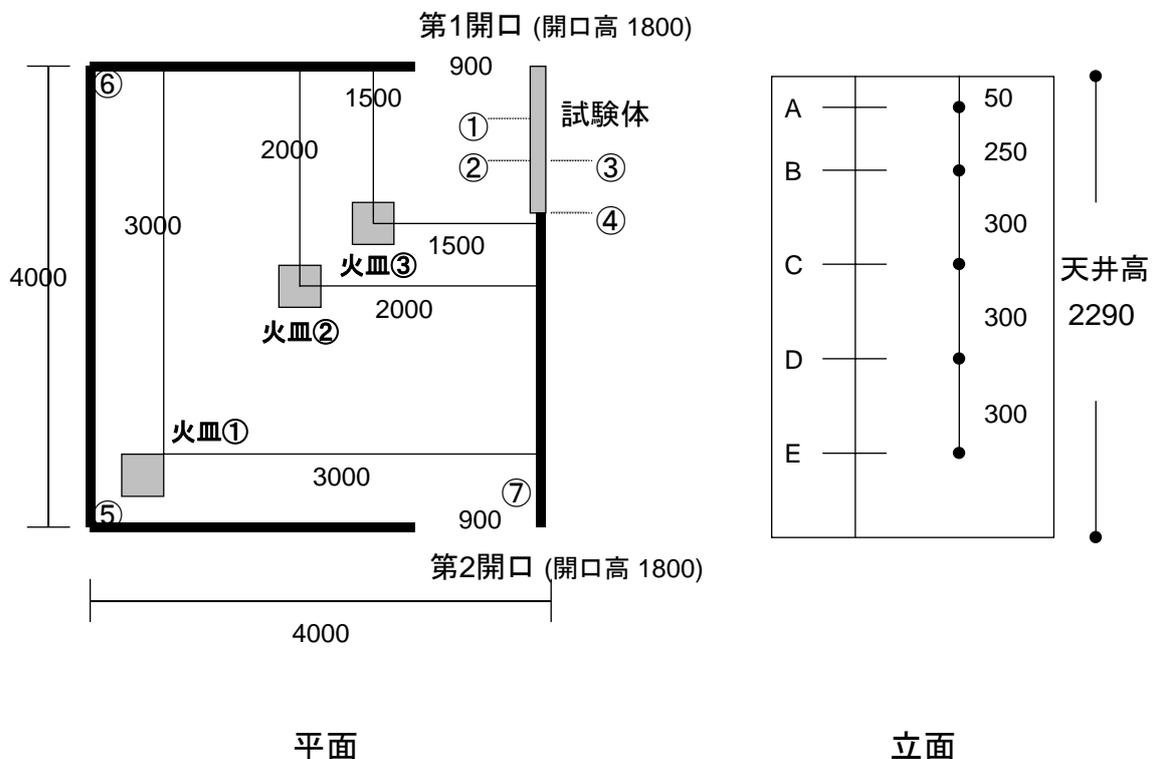


図5 火災室内の熱電対設置位置

実験（No.1 から No.4-2）においては、開口部位置や火源位置、助燃材の量などを変化させた。
その結果、第1開口を閉鎖し、火源位置を試験体の防火ガラス近傍に寄せた火皿3とし、助燃剤
のヘプタンを1.5リットルとすることで、加熱側ガラスの一部に所定の温度上昇を再現性良く、
確保できることを得た。従って本実験を上記の実験条件で実施することとした。

4.5 防火ガラスの高温特性把握実験（事前実験3）

4.5.1 目的

事前実験3は、本実験に用いる3種の防火ガラスの高温時における破壊挙動特性を把握し、本実験の安全性を確保するための資料のひとつとすることを目的とする。

4.5.2 実験方法

実験方法は、電気加熱炉を用いて一定高温まで加熱した後、ガラスに荷重を加えて破壊荷重及び変位を測定することにより、防火ガラスの高温時の破壊挙動を確認するものである。

【加力部分】

加力試験は、DRAFT INTERNATIONAL STANDARD ISO/DIS 1288 の Determination of the bending strength of glass (ISO 法と略記する) を参考とし、グリフィス傷の方向性をカバーするために同心円曲げ試験を採用した。

なお ISO 法は、加力の際に試験体を治具で傷をつけないために厚さ約 0.1mm の紙あるいは合成樹脂及びシリコンゴムを、試験体と加力治具の間に挟むことになっている。しかし、本実験では治具及び試験体が高温下に置かれる。それら挟み込まれる材料は耐熱性に問題があるために採用を見送り、その代替としてリングの先端部分を幅 0.5~1.0mm の環状平面とした。

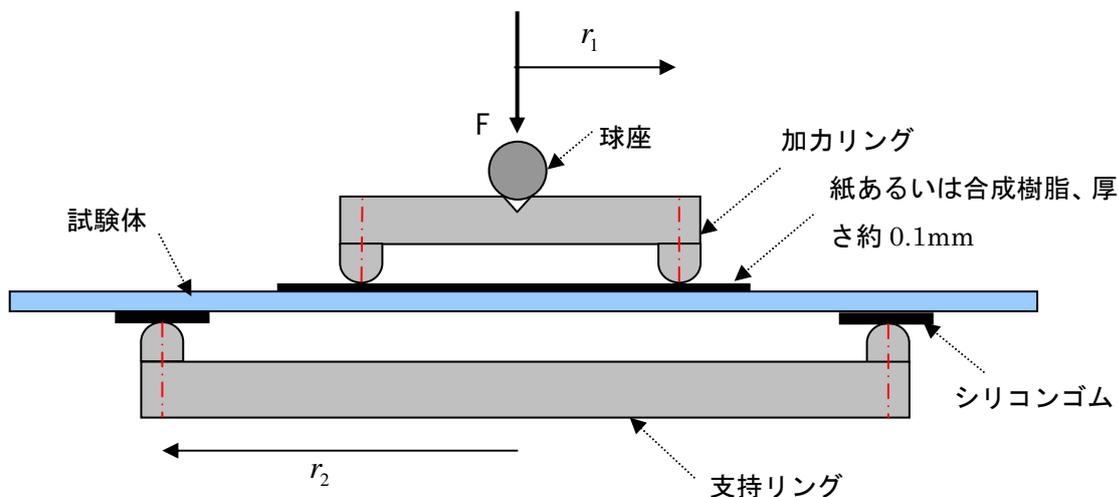


図1 DRAFT INTERNATIONAL STANDARD ISO/DIS 1288 の曲げ応力測定に加圧方法

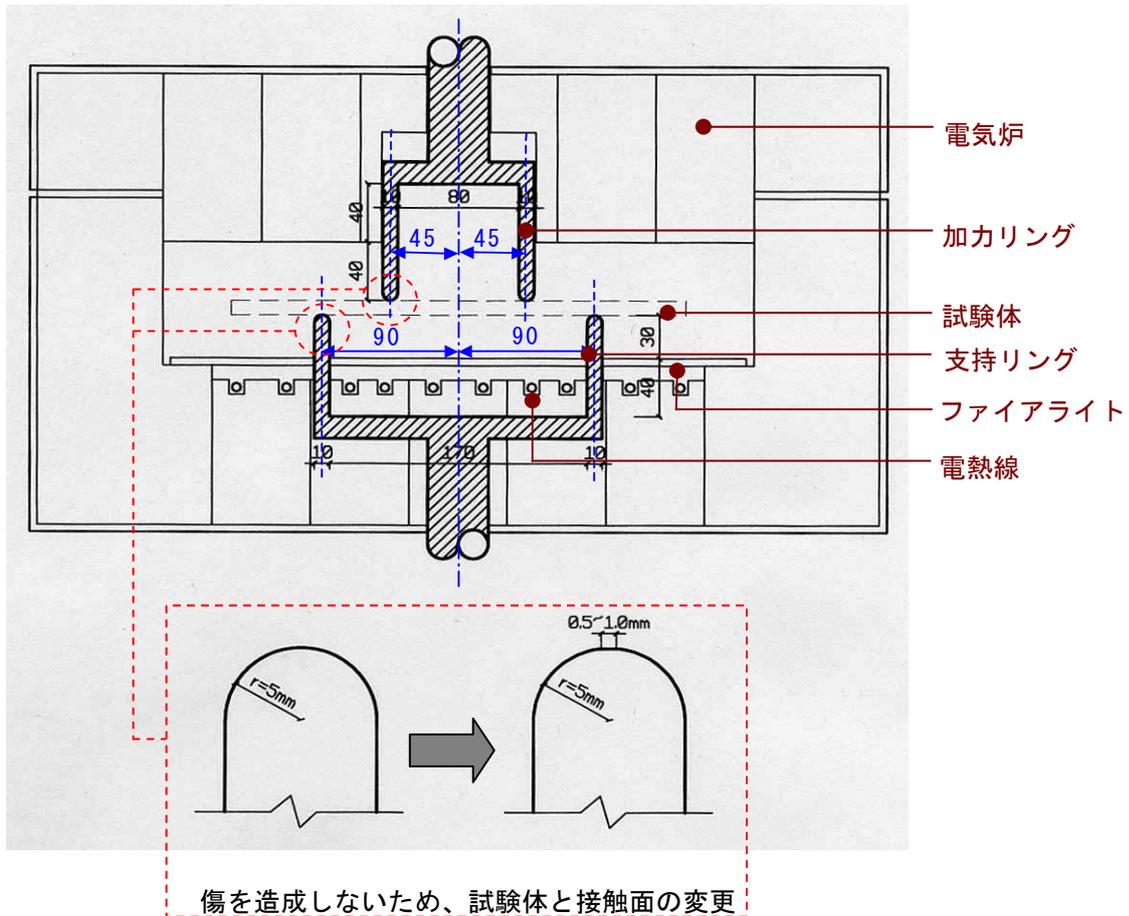


図2 本実験の曲げ応力測定のための加圧方法

図1にISO法で用いられている加力試験の治具の詳細を示す。リングの半径は、「同心円負荷円板曲げ法による板ガラスの曲げ強さ」を参考とした。その結果、加力リング (r_1) 及び支持リング (r_2) の比率を1:2とし、試験体サイズに応じて、 r_1 を90mm、 r_2 を180mmとした。

また、図2に本実験に用いた加熱・加力装置を示す。写真1に加力装置を、また、写真2にその全体を示す。

加力は、手動の油圧シリンダにより行い、ガラスが破壊した時点で加力を停止した。荷重はロードセルで測定し、ガラス面の変位は変位測定用リング移動量を計測することにより求めた。

常温時における環状平面を用いた場合と、ISO法の間には有意差は認められなかった。

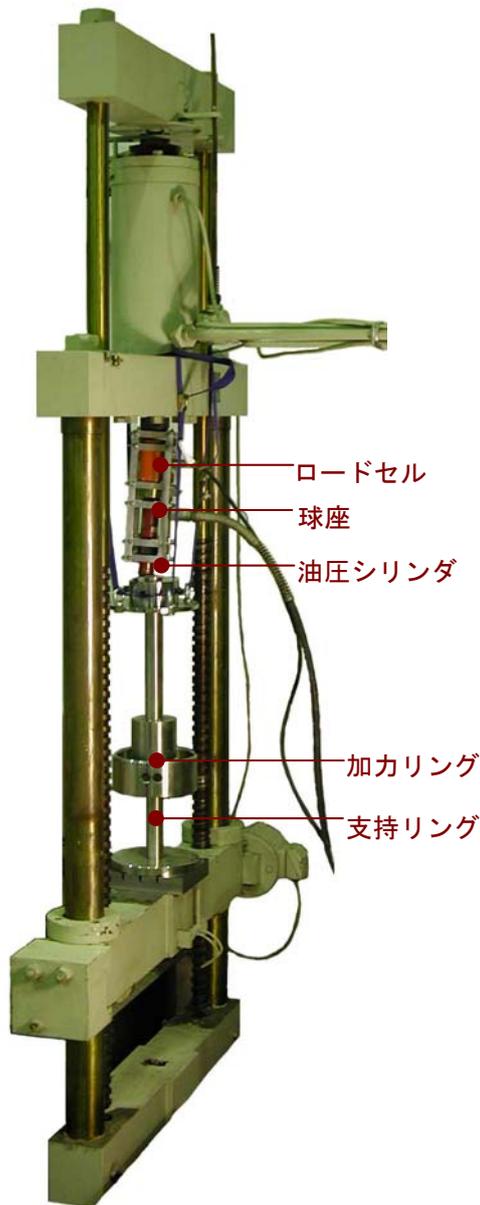


写真1 加力装置



写真2 装置の全容

【加熱部分】

加熱部分は電気加熱炉を自作し、基礎実験で昇温時に試験体が一様に昇温加熱できることを確認した後、本試験を行った。

具体的には、試験体に温度差を生じさせないために、加熱炉内部に加力治具及び試験体を内包した状態で加熱することを前提とし、その内部、試験体及び治具の温度差を最小限にする構成を検討し、試験体に温度応力が生じないように設計製作した。

その構成は、金属製の枠の中に断熱材を配置し、その内部に治具及び加力可能な空間を設け炉とした。熱源はニクロム線とし、温度調節器に繋いで所定の温度を得る構造とした。また、試験体を均一加熱するため、図2のようにファイアライトを一枚設置した。

【試験体】

今回用いた試験体は表 1 の通りである。

表 1 防火ガラス試験体

ガラスの種類	商品名	販売会社名	厚さ	寸法	枚数
耐熱結晶化ガラス	ファイアライト	日本電気硝子	8mm	200×300mm	5
			5mm	200×300mm	5
低膨張防火ガラス	ピラン	旭硝子	6.5mm	200×300mm	4
耐熱強化ガラス	パイロクリア	日本板硝子	8mm	200×300mm	4

4.5.3 実験結果

加熱は、前述のようにニクロム線により行った。加力は手動の油圧シリンダにより行い、ガラスが破壊した時点で加力を停止した。荷重はロードセルで測定し、ガラス面の変位は変位測定用リング移動量を計測することにより求めた。

加熱・加力試験を行う際、測定した変位あるいは荷重が計測範囲を超えた場合は、その最高値を測定値とした。変位の計測範囲は約 10mm だが、設定温度に達する時の加力リングの熱膨張により変わる。荷重の計測範囲は約 4550kgf であった。また、加力前に加力リングの自重のみで変位が大きくなり、計測範囲を超えた場合は加力を行わなかった。

得られた破壊荷重を表 2 に示す。また、前述の計算式により、計算した破壊強度を表 3 に示す。

加熱する過程で、試験体が歪点を越え比較的大きなたわみを生じたものがあった。その際に、試験体のガラスの板厚の半分以上のたわみを生ずる場合は、ガラス板の中央面に生ずる引張りの影響を無視できなくなり、与えられた荷重に対するたわみ及び最大応力は計算値より小さくなると推定されるが、本予備実験では、それらの影響を無視した形で計算を行った。

表 2 事前実験で得られた破壊荷重

ガラスの種類	耐熱結晶化ガラス		低膨張防火ガラス	耐熱強化ガラス
販売会社名	日本電気硝子		旭硝子	日本板硝子
商品名	ファイアライト		ピラン	パイロクリア
厚さ	5mm	8mm	6.5mm	8mm
常温	214kgf	1152kgf	1050kgf	4191kgf
500℃	337kgf	938Kgf	1173kgf	2478kgf
600℃	316kgf	938Kgf	795kgf	1061kgf
650℃	245kgf	969kgf	184kgf 以上	122kgf 以上
800℃	642kgf	1010kgf		

注：ピランとパイロクリアは、650℃において、ガラスの変形が測定限界まで到達した。

表3 事前実験で得られた破壊応力（単位： kgf/cm^2 ）

ガラスの種類	耐熱結晶化ガラス		低膨張防火ガラス	耐熱強化ガラス
販売会社名	日本電気硝子		旭硝子	日本板硝子
商品名	ファイアライト		ピラン	パイロクリア
厚さ	5mm	8mm	6.5mm	8mm
常温	468	984	1340	3559
500℃	736	801	1496	2104
600℃	691	801	1014	961
650℃	535	827	234 以上	104 以上
800℃	1404	862		

註：1.ファイアライトのポアソン比は0.24、パイロクリアは0.22、ピランは0.19とした。
2.比較的大きなたわみが生じ、計算値より小さくなる部分に網かけした。

各種ガラスの設定温度における最大曲げ荷重の変化割合を常温時の曲げ荷重を1として計算したものを図3に示す。

各ガラスの破壊応力の関係及び破壊状況について図4から図23に示す。

上記の結果から、耐熱結晶化ガラスは、ガラスの個体差による強度変化が認められたものの、今回の設定温度範囲においては、5mm、8mmとも温度により強度が低下することはなく、800℃までの設定温度では、ほぼ変化がなかった。

低膨張防火ガラスは、500℃では常温とほぼ同一傾向であるが、約520℃の歪点を越えた600℃では強度が大幅に低下し、650℃では僅かな加力だけで変位だけが大きくなった。これは、ガラスとしての物性が変化したためであり、得られた強度及び変位は参考として記載した。

耐熱強化ガラスは、約510℃の歪点近い500℃の加熱で強度の低下が出始め、600℃ではさらに強度低下が進み、650℃では加力により変形が一気に増大した。

比率

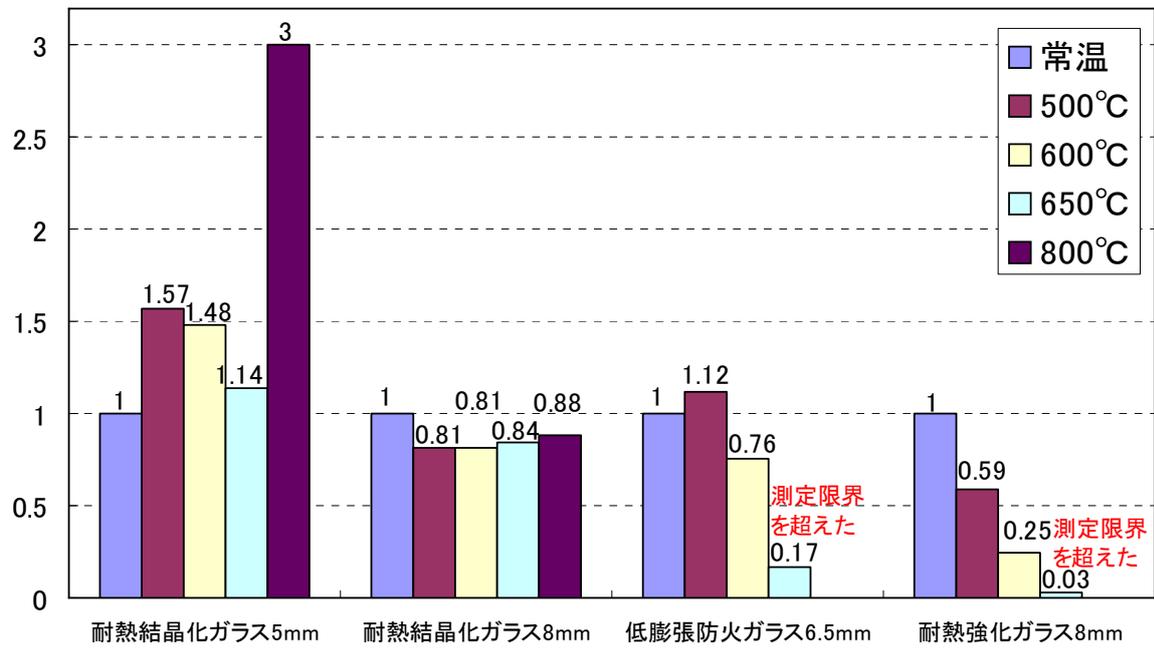


図3 各温度における曲げ荷重の比率変化

註：低膨張防火ガラスと耐熱強化ガラスは650°Cの際、荷重により変形が測定限界まで到達した。

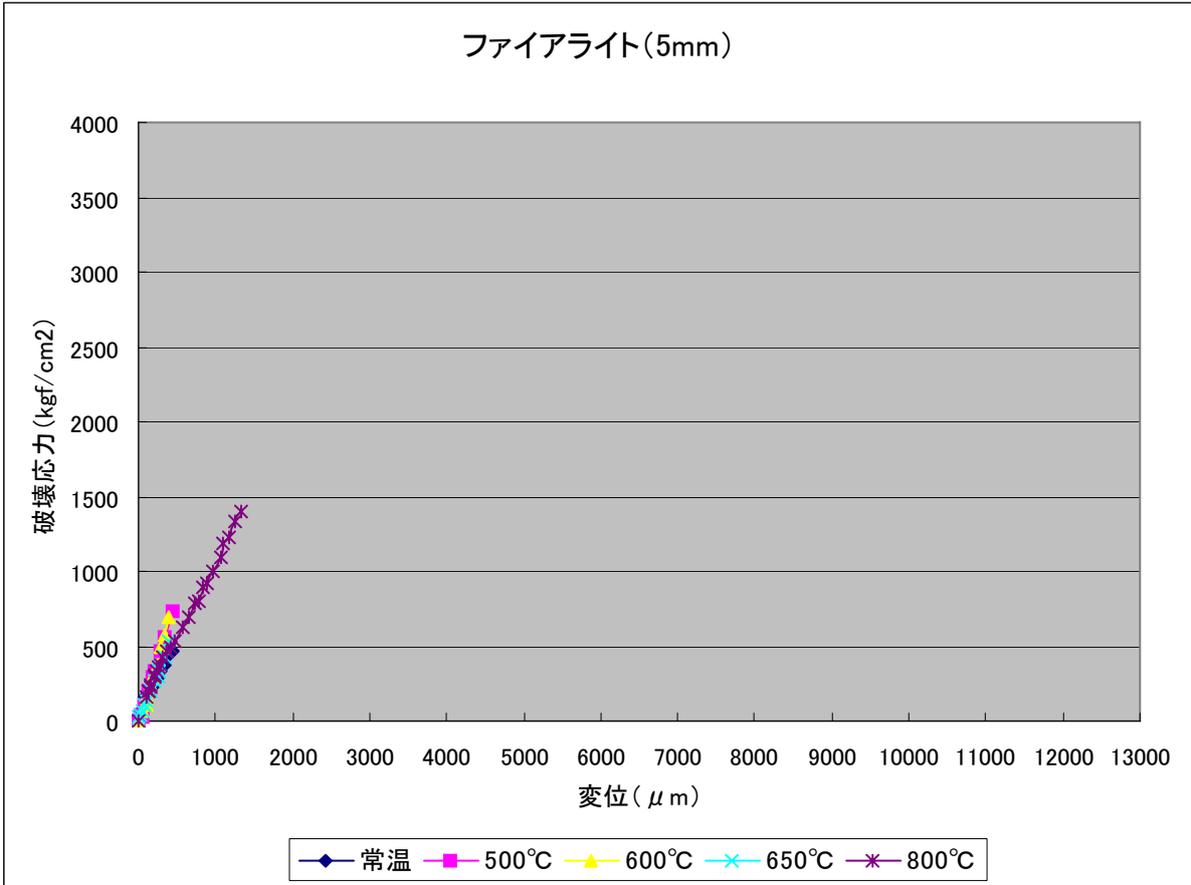


図4 ファイアライト (5mm) の破壊応力と変位

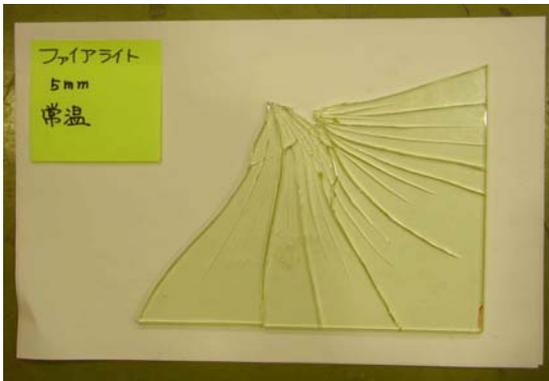


図5 ファイアライト (5mm) 常温



図6 ファイアライト (5mm) 600°C加熱

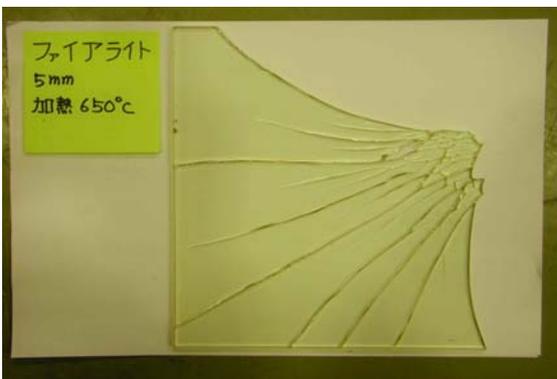


図7 ファイアライト (5mm) 650°C加熱



図8 ファイアライト (5mm) 800°C加熱

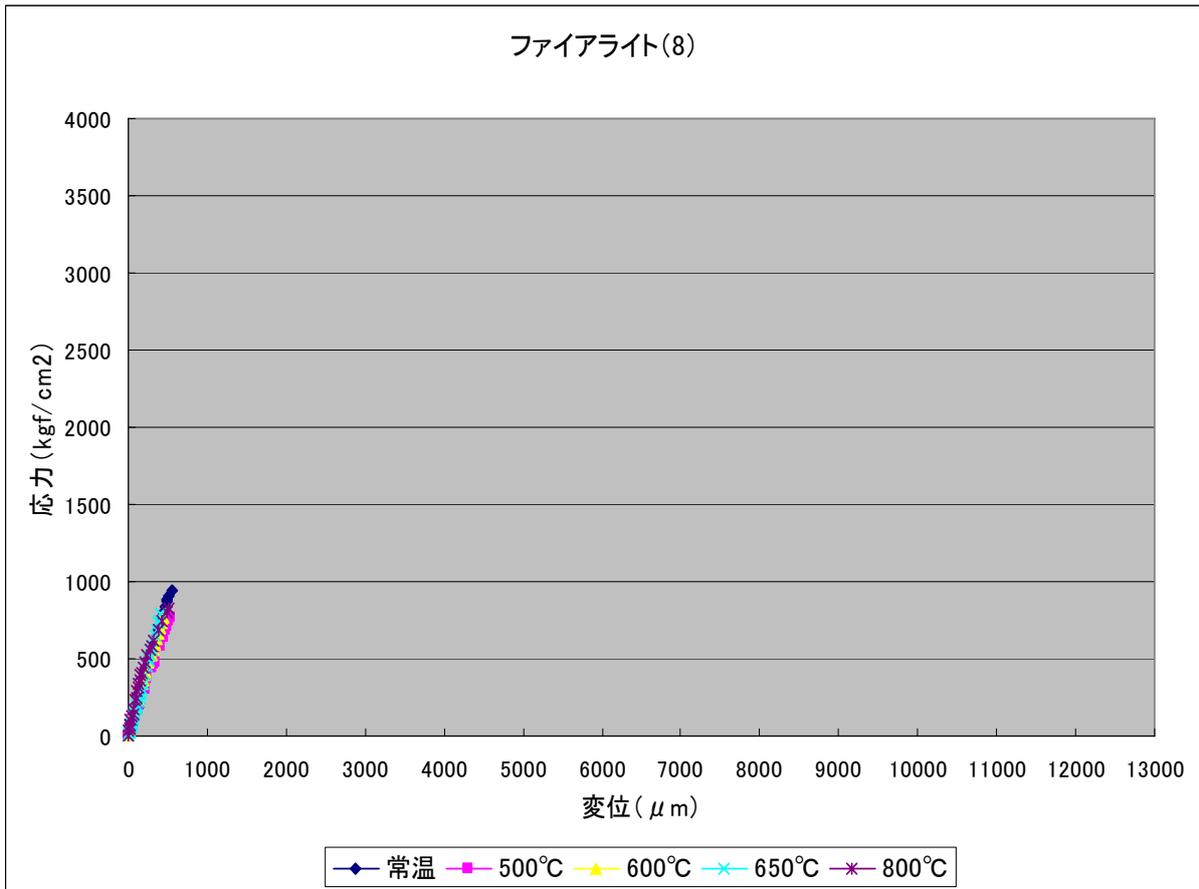


図9 ファイアライト (8mm) の破壊応力と変位



図10 ファイアライト (8mm) 常温



図11 ファイアライト (8mm) 600°C加熱



図12 ファイアライト (8mm) 650°C加熱



図13 ファイアライト (8mm) 800°C加熱

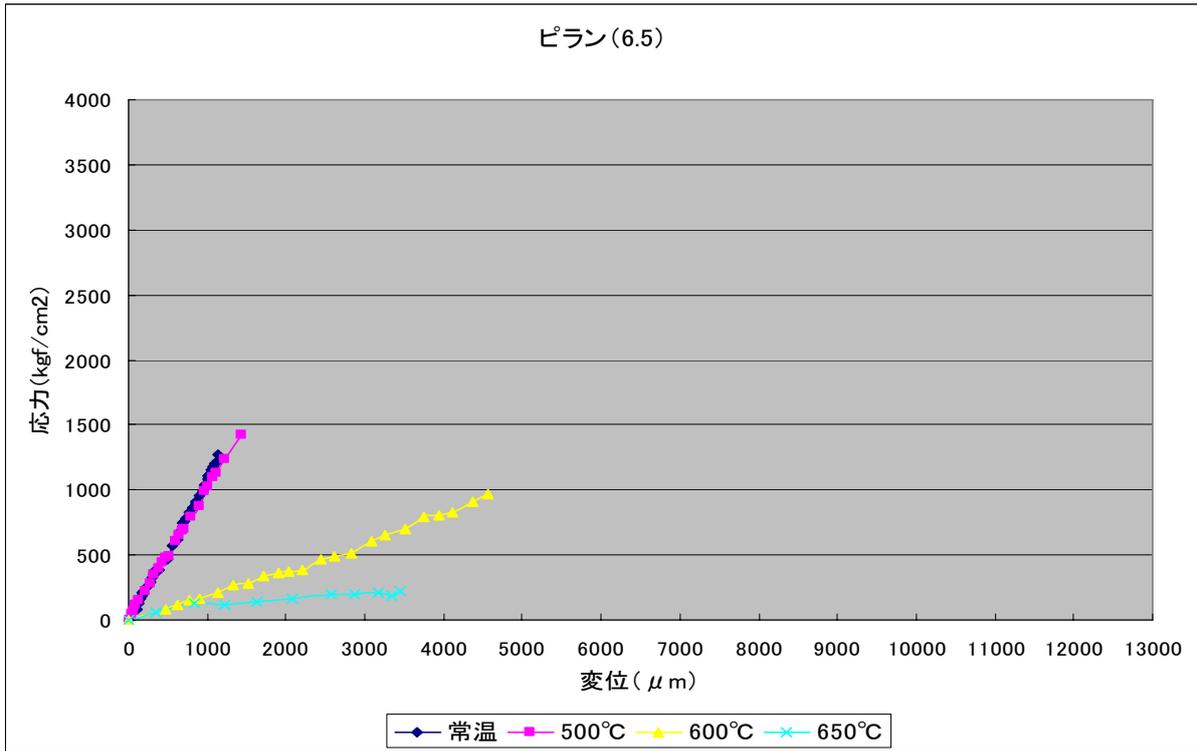


図 14 ピランの破壊応力と変位

註：650°Cの際の応力は234kgf/cm²に達したが、荷重により変形が測定限界まで到達した。



図 15 ピラン 常温

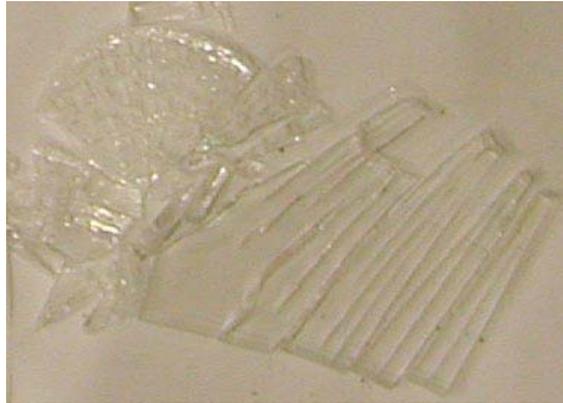


図 16 ピラン 500°C加熱



図 17 ピラン 650°C加熱



図 18 ピラン 650°C加熱

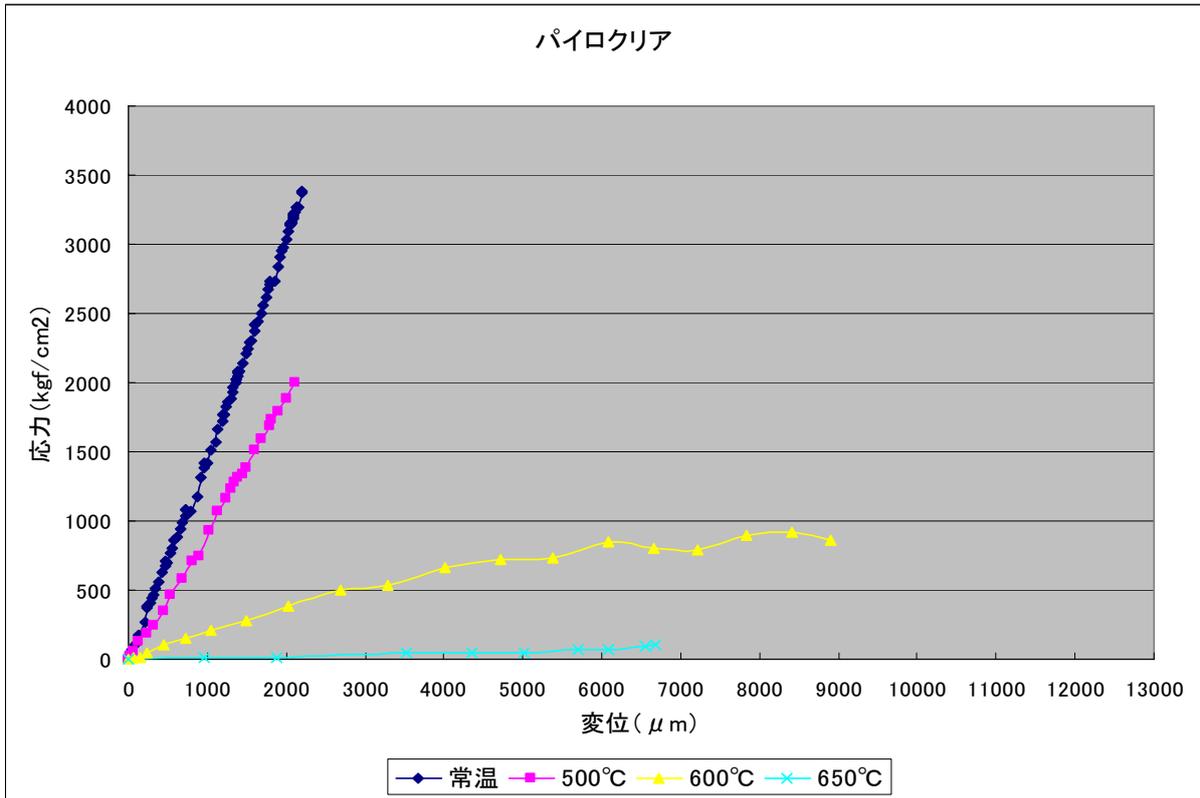


図19 パイロクリアの破壊応力と変位

注：650°Cの際の応力は104kgf/cm²に達したが、荷重により変形が測定限界まで到達した。



図20 パイロクリア 常温



図21 パイロクリア 500°C加熱



図22 パイロクリア 600°C加熱



図23 パイロクリア 650°C加熱

4.5.4 事前実験3のまとめ

事前実験3として、高温時における防火ガラスの破壊挙動の一つとして、静的な高温環境下における曲げ荷重及び変位を求める方法を考案し試験を実施した。

その結果、各ガラスの特徴を良く現した結果が得られた。耐熱結晶化ガラスは破壊荷重に若干違いがあるものの、荷重と変位の関係は温度による影響がなくほぼ一定であった。これは、今回の設定温度領域ではガラスの挙動に変化が生じなかったためと思われる。

また、低膨張防火ガラスは常温と500℃はほぼ同一傾向だったが、600℃では変形が極端に大きくなった。これは、低膨張防火ガラスの転移温度領域が500～600℃の間に存在するためだと思われる。

さらに、耐熱強化ガラスは500℃から強度が落ちはじめ、600℃では変形が極端に大きくなった。これは、耐熱強化ガラスが歪点に近づき強度が低下し、600℃ではガラスの転移温度領域を超えたために極端に変位が大きくなったものと思われる。

今回の事前実験3では、ガラスの試験体は各種・各水準で一枚だけであった。今回の結果のみでそのガラス種の特徴を全て代表しているとは言い切れないが、高温になったガラスが歪点に達して荷重が低下した低膨張防火ガラス、また、それ以上の温度では治具の形で変形するなどの転移温度領域の特徴を示した耐熱強化ガラス、その一方で、荷重と変位の関係に温度依存性が認められなかった耐熱結晶化ガラス、それぞれのガラスの特徴を良く現した結果が得られたと思われる。

なお、今後は加力リングの倍率を変化させて、支持リングとの比率の違いがその破壊加重や変位にどのような影響を与えるか検討する余地があると思われる。

5. 実験

実験では、実験空間の規模、模擬火源の規模、設置位置などの工夫によって防火ガラスの非加熱側温度を 500℃以上に確保してガラスの高さ方向に温度差をつけた状態を作り出し、対象とするガラス面の非加熱側に事前準備で求められた再現性のある水球衝突法により一定量の水を衝突させ、高さ方向及び厚さ方向の温度差による熱的な衝撃によるガラス破壊発生の有無を確認した。水球・水道ホース放水の衝突位置は日本電気硝子株式会社において事前にコンピュータ予測した 4.1 に示した図 2 をもとに破壊の可能性の大きい部分とした。

5.1 実験方法

1) 実験装置

独立行政法人消防研究所総合消火研究棟主実験場内に設置されている 4.4 に示す実験装置(床面積 36m² (6m角の正方形)、天井高さ 2.3m)を利用して実験を実施した。

2) 試験体の種類と形状

実験に用いる防火ガラスは、耐熱結晶化ガラス(ファイアライト) t 5 mm、低膨張防火ガラス(ピラン) t 6.5 mm、耐熱強化ガラス(パイロクリア) t 8 mm、網入りガラス t 6.8 mm の全 4 種類とした。

各種試験体は、4.4 に示す実験区画の図に明記した個所および枠材(外形寸法幅 1.65m、高さ 2.3m)にて取付ける。このとき、防火ガラスの枠材への施工は、国土交通省が定める試験方法に合格した標準的な施工方法に準じ、ガラス面寸法は概ね幅 1.22m、高さ 1.93mである。

ただし、事前実験 2 では枠仕様は、スチール枠とし、ガラスの呑込み寸法は 4.4 に示す枠材図のごとくとした。

3) 模擬火源と配置、助燃剤の量、区画及び開口部位置

模擬火源は、消火性能検定実験に用いられている 2 号クリブ 2 段積みとした。ただし、火災継続時間を 15 分程度確保するために補助的な燃料(n-ヘプタン)を追加する。1.5 リットルと 3 リットルの 2 ケースを比較したが 1.5 リットルの方が安定した燃焼状況が得られたので、多くの実験は 1.5 リットルとした。

防火ガラスの内部温度が 500℃以上を確保するための実験空間の規模や模擬火源の位置は事前実験 2 によって決定した。

2 層ゾーンモデルによる略算の結果からは空間を 4m×4mに縮小する必要が認められた。そこで空間の縮小は珪酸カルシウム板製の衝立によった。

一方、実験装置の構造体を加熱から保護することなどを勘案して、模擬火源の設置位置は、当初原空間(6m×6m)の中央部に設置する予定であったが、事前実験 2 の結果、最終的には北側開口部(第 1 開口)より 1.5m×1.5mの位置とした。

空気の取り入れ開口部の位置は、熱溜まりの形成、装置構造体への影響などを勘案して西側開口部(第 2 開口)を開放することとした。

4) 消防用ホース放水の代案として使用した水球

事前実験 1 の結果を踏まえてポリ塩化ビニリデンフィルム(0.01mm)で作製した袋に一水量の水を入れて、所定位置にそれを衝突させることとした。場合によっては水道水ホースによる放水も追加した。水量は実験毎に変化させ、実験 No.11 では最大約 930cc まで実施した。

5) 計測項目と方法

基本的な計測項目は、4.4章の図5に併示するように火災室内の温度分布（3箇所温度測定ポール⑤-⑦（開口部、コーナー部2箇所）、各高さ方向に5点、ならびにガラス表面近傍温度（ファイアライトの場合のみ測定、室内側各5点2箇所（ポール①、②）、非加熱側はガラス枠位置ポール④並びにガラス中央位置ポール③（温度測定ポール②位置に対応））を熱電対にて測定した。さらに非加熱側のガラス表面温度を接触型温度計および赤外線カメラ2台（高温域（800℃まで）、低温域（250℃以下）により測定した。

その他複数のビデオカメラなどで画像情報（高速撮影ビデオカメラなど）を記録した。また、ガラスの破損の有無・状況・形状や飛散範囲などの計測を行った。

実験の状況は、ビデオ映像で記録した。特にガラスの破壊状況については遠隔操作による高速撮影を試みた。撮影はカジマビジョンなどが実施した。なお高速ビデオの撮影として No.3 から No.11 の実験では1秒400コマの撮影を、さらに No.11 のみ2000コマの撮影を行った。

5.2 実験結果

1) 防火ガラスの実験観察結果

本実験の結果をまとめると表1の通りである。以下に、代表的な特色を整理した。

- ・ 耐熱結晶化ガラス（ファイアライト）は加熱や水球衝突による変化はなかった。
- ・ 低膨張防火ガラス（ピラン）は、水球を衝突させても破損や脱落には至らなかったが、加熱によってガラス面は大きく湾曲した。
- ・ 耐熱強化ガラス（パイロクリア）は4回の実験においてすべて破損した。1回は、水道ホース放水による。また1回は、水球衝突によりガラスは細かな粒状で破損脱落した。残りの2回は着火から4～8分で水球衝突前に破壊した。このことから、ガラスの高温時における不安定な特性に起因する弱点とガラスと枠材の施工精度に依存する弱点が考えられる。
- ・ 網入りガラスは、ガラスの脱落はなかったが、加熱初期に大きな亀裂を、水球衝突後には更に微細な亀裂を発生させた。

表1 実験一覧表

実験 No.	実験日時	ガラスの種類	水球水量 ml	水球衝突時間 min	ガラスの主な挙動
1	04. 10. 27pm	ファイアライト	—	—	変化無し
2	04. 10. 28am	ファイアライト	—	—	変化無し
3	04. 10. 28pm	ファイアライト	211	10	変化無し
4-1	04. 11. 01am	ファイアライト	180	10	変化無し
4-2	04. 11. 01am	ファイアライト	200	10	変化無し
5	04. 11. 05am	網入りガラス	690	9	1分で大きな亀裂 水球により微細亀裂
6	04. 11. 02am	ピラン	200	10	湾曲有り
7	04. 11. 02pm	パイロクリア	340	8	湾曲有り
8	04. 11. 04pm	ピラン	510	9	湾曲有り
9	04. 11. 04am	パイロクリア	340	7	湾曲有り
11	04. 11. 05am	パイロクリア	930	8.5	水球衝突時に破損 直後に脱落
12	05. 06. 13am	ファイアライト	930	6	変化無し・破損無し
13	05. 06. 14am	ピラン	910	7	湾曲有り・破損無し
14-1	05. 06. 14pm	パイロクリア	—	—	4分後に破損・脱落
14-2	05. 06. 14pm	パイロクリア	—	—	8分後に破損・脱落

表2に2004年度に行った、4種類の各防火ガラスの実験観察結果を示した。また、表3には2005年度に行った、網入りガラスを除く3種類の防火ガラスの実験観察結果を示した。なお、耐熱強化ガラスのみ、破損状況の確認のため2回行った。

表2 各防火ガラスの実験観察結果 (2004年度)

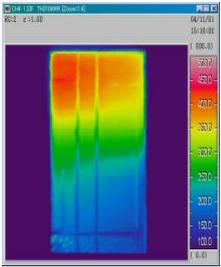
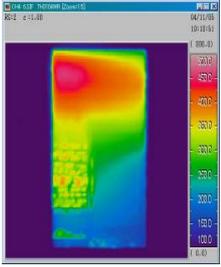
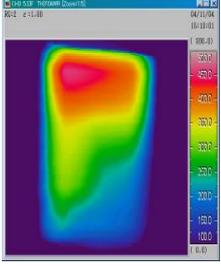
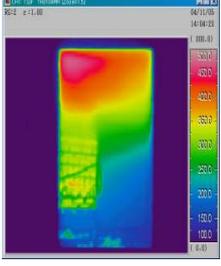
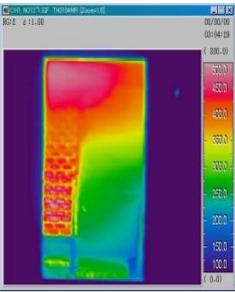
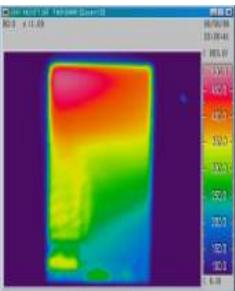
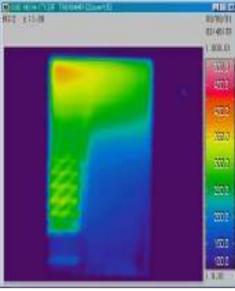
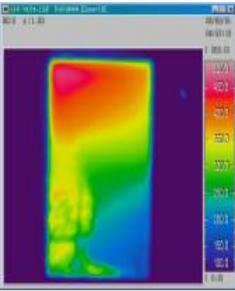
耐熱結晶化ガラス		放水時状態		ガラス面赤外温度
実験番号	N o 4 - 2			
燃烧台位置	2.0×2.0m 中央			
加熱面側温度	702℃(7分)			
ガラス面温度	430℃			
放水方法	水球10分後			
破損状況	破損無し 変化無し			
網入りガラス		クラック発生	放水時状態	ガラス面赤外温度
実験番号	N o 5			
燃烧台位置	1.5×1.5m 中央			
加熱面側温度	701℃(7分)			
ガラス面温度	470℃			
放水方法	水球9分後			
破損状況	1分後亀裂 貫通無し			
低膨張防火ガラス		放水時状態		ガラス面赤外温度
実験番号	N o 8			
燃烧台位置	1.5x1.5m 中央			
加熱面側温度	685℃(6.5分)			
ガラス面温度	470℃			
放水方法	水球9分後			
破損状況	破損無し 湾曲有り			
耐熱強化ガラス		放水時状態	破損状況	ガラス面赤外温度
実験番号	N o 11			
燃烧台位置	1.5x1.5m 中央			
加熱面側温度	706℃(7.5分)			
ガラス面温度	470℃			
放水方法	水球8.5分後			
破損状況	放水後破損 爆裂落下			

表3 防火ガラスの実験観察結果 (2005年度)

耐熱結晶化ガラス		放水時状態		ガラス面赤外温度
実験番号	N o 1 2			
燃烧台位置	1.5×1.5m 中央			
加熱面側温度	6 4 7 °C (6分)			
ガラス面温度	5 0 5 °C			
放水方法	水球 6分後			
破損状況	破損無し 変化無し			
低膨張防火ガラス		放水時状態		ガラス面赤外温度
実験番号	N o 1 3			
燃烧台位置	1.5×1.5m 中央			
加熱面側温度	6 7 5 °C (6.5分)			
ガラス面温度	4 7 0 °C			
放水方法	水球 6分後			
破損状況	破損無し 湾曲有り			
耐熱強化ガラス		破損時状態	破損後状態	ガラス面赤外温度
実験番号	N o 1 4 - 1			
燃烧台位置	1.5x1.5m 中央			
加熱面側温度	6 2 9 °C (4分)			
ガラス面温度	3 8 5 °C			
放水方法	放水無し			
破損状況	4分後自然破損 爆裂落下			
耐熱強化ガラス		破損時状態	破損後状態	ガラス面赤外温度
実験番号	N o 1 4 - 2			
燃烧台位置	1.5 x 1.5m 中央			
加熱面温度	6 3 5 °C (6.5分)			
ガラス面温度	4 7 0 °C			
吸水方法	放水無し			
破損状況	6.分後自然破壊			

2) 実験空間内外の温度性状

a) 熱電対による計測結果

以下に、表 1 に示した実験 1 から実験 14 - 2 までの温度測定値を示す。

実験 1 (ファイアライト)

2004. 10. 27

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホール 1-A	349	459	510	554	453	576/7
B	417	497	536	572	458	591/7
C	403	466	498	537	418	546/7
ホール 3-B	22	31	38	67	75	79/7
C	20	24	28	41	49	49/7
ホール 4-B	19	20	24	31	51	53/16
C	18	20	24	29	44	45/17
ホール 5-A	929	778	819	844	561	1001/6
B	966	769	795	847	521	1002/6
C	913	905	918	556	493	1013/6
ホール 7-A	605	646	663	695	504	762/7
B	542	598	607	638	488	724/7
C	432	521	543	581	474	672/7

実験 2 (ファイアライト)

2004. 10. 28

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホール 1-A	546	542	563	573	460	610/7
B	615	564	577	574	460	624/7
C	547	479	483	483	433	568/7
ホール 3-B	37	41	50	66	78	90/8
C	30	28	32	40	48	55/8
ホール 4-B	20	24	29	38	53	57/11
C	20	23	27	32	43	46/13
ホール 5-A	547	560	589	608	458	656/6
B	561	559	579	599	446	654/6
C	545	533	547	558	434	622/6
ホール 7-A	483	480	503	501	480	605/7
B	523	504	523	518	468	616/7
C	506	480	502	504	469	672/7

実験3 (ファイアライト)

2004. 10. 28

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホール1-A	513	501	540	574	492	603/7
B	539	512	538	576	496	608/7
C	489	464	494	524	470	559/7
ホール3-B	36	47	64	77	89	92/8
C	30	38	42	45	56	59/8
ホール4-B	33	34	39	46	63	68/12
C	30	32	36	42	50	55/13
ホール5-A	583	604	630	667	546	707/7
B	608	597	625	657	540	697/7
C	580	563	591	623	528	664/7
ホール7-A	690	685	695	696	499	717/7
B	612	572	592	612	481	634/7
C	535	460	512	527	473	573/7

実験4-1 (ファイアライト)

2004. 11. 01

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホール1-A	448	474	481	512	560	560/9
B	482	489	487	513	562	562/9
C	434	450	446	466	516	516/9
ホール3-B	32	46	51	75	115	115/9
C	28	36	35	49	72	72/9
ホール4-B	23	26	31	39	59	68/15
C	23	28	32	38	51	55/15
ホール5-A	593	633	627	620	643	661/8
B	594	622	607	610	633	654/8
C	543	593	555	571	597	612/8
ホール7-A	746	723	725	729	623	749/8
B	651	634	583	602	569	636/7
C	542	532	439	491	556	556/9

実験4-2(ファイアライト)

2004. 11. 01

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホール1-A	448	446	472	521	527	568/7.5
B	482	468	482	522	533	567/7.5
C	444	432	442	475	493	519/8
ホール3-B						
C						
ホール4-B	37	41	42	47	65	75/13.5
C	35	38	38	43	54	60/14
ホール5-A	611	605	601	643	655	696/8
B	606	594	595	633	640	689/8
C	552	549	549	597	600	637/8
ホール7-A	683	659	625	686	590	702/7
B	616	558	560	581	538	611/7.5
C	495	414	424	524	522	546/8

実験6(ピラン)

2004. 11. 02

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホール4-B	21	22	25	28	37	41/14
C	21	22	23	25	33	39/15
ホール5-A	597	604	596	626	671	683/8.5
B	579	583	581	616	658	671/8.5
C	512	531	525	597	609	619/8.5
ホール7-A	717	682	691	704	605	718/6.5
B	620	554	554	581	547	605/6.5
C	472	395	396	461	527	541/8.5

実験7(パイロクリア)

2004. 11. 02

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホール4-B	26	27	27	32	39	50/8
C	27	26	26	30	33	40/13
ホール5-A	628	614	613	641	635	702/8
B	612	596	599	632	625	687/8
C	540	536	534	588	597	631/8
ホール7-A	740	708	696	716	598	727/6
B	633	569	564	601	551	606/6
C	491	406	422	497	531	554/8

実験9 (パイロクリア)

2004. 11. 04

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホール5-A	491	506	533	560	533	589/7.5
B	481	495	522	551	525	580/7.5
C	462	466	486	525	518	560/7.5
ホール7-A	696	642	635	673	592	714/7.5
B	590	545	535	570	543	620/7.5
C	480	447	441	509	514	537/7.5

実験8 (ピラン)

2004. 11. 04

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホール5-A	499	509	534	564	547	596/7
B	494	504	524	552	539	590/7.5
C	484	473	489	532	529	573/7.5
ホール7-A	689	635	620	681	598	685/6.5
B	586	554	534	580	547	598/7.5
C	498	445	459	520	522	561/7

実験5 (網入りガラス)

2004. 11. 05

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホール5-A	491	506	540	566	529	585/6
B	480	498	528	554	524	573/6
C	470	476	494	530	514	549/7
ホール7-A	682	642	643	676	586	701/7
B	578	552	549	579	538	600/7
C	481	455	443	510	528	541/6.5

実験11 (パイロクリア)

2004. 11. 05

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホール5-A	506	518	538	561	500	605/7.5
B	506	508	526	550	493	595/7.5
C	490	475	494	514	450	560/7.5
ホール7-A	682	633	620	656	556	706/6.5
B	588	557	544	570	517	620/7.5
C	502	460	461	508	400	557/7

実験12 (ファイアライト)

2005. 6. 13

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホ°-ル5-A	383	467	509	554	541	624/7.3
B	401	486	523	568	542	644/7.2
C	406	469	506	556	534	640/7.1
ホ°-ル7-A	567	560	598	647	512	647/5.0
B	487	509	539	586	510	613/6.9
C	416	467	500	544	498	593/6.9

実験13 (ピラン)

2005. 6. 14

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホ°-ル5-A	423	478	509	552	459	600/7.1
B	434	496	520	564	455	617/7.1
C	433	481	503	551	441	604/7.2
ホ°-ル7-A	591	595	622	653	461	675/6.5
B	516	532	551	589	455	624/7.2
C	446	470	500	538	431	564/7.1

実験14-1 (パイロクリア)

2005. 6. 14

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホ°-ル5-A	425	477	512	520	277	541/4.1
B	440	500	524	525	218	547/4.1
C	436	486	505	497	158	535/4.2
ホ°-ル7-A	575	585	624	600	279	634/4.2
B	424	530	550	545	198	570/4.0
C	450	473	494	446	153	519/4.1

実験14-2 (パイロクリア)

2005. 6. 14

	1分	2分	3分	5分	9分	MAX/分
ホ°-ル5-A	436	489	514	557	454	590/7.0
B	449	510	523	566	445	602/7.5
C	445	490	501	545	416	590/7.5
ホ°-ル7-A	568	565	569	618	434	639/6.7
B	514	519	529	576	420	593/6.5
C	446	464	485	520	341	550/7.6

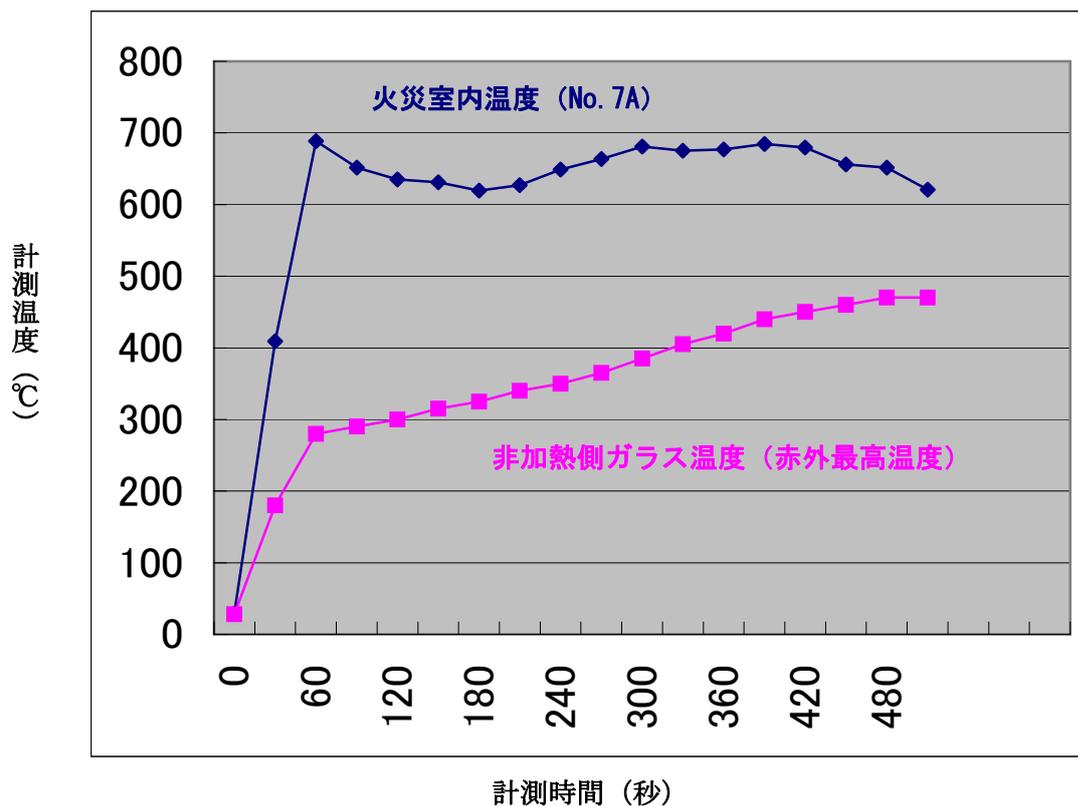


図1 火災実験室内外の温度計測の一例 (実験 No. 11)

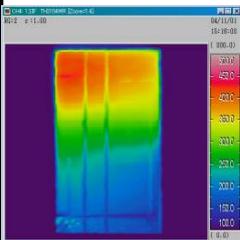
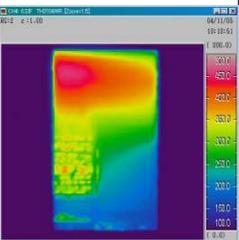
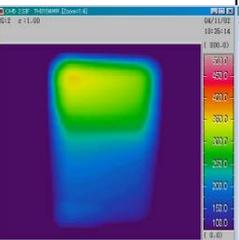
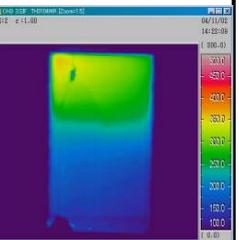
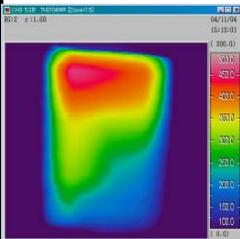
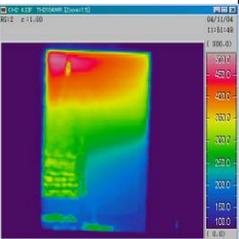
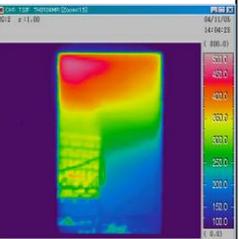
本実験としての、実験番号6以降の各実験における火災室内温度は、ほぼ一様な傾向を示した。

熱電対用ポールNo7A点の温度推移を見ると、図1に示すように、概ね1分後に600°Cから700°C弱となる。それ以降はほぼ一定の温度となって、火源の木材クリブの大半が燃焼する480秒頃から温度降下している。

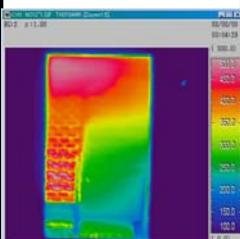
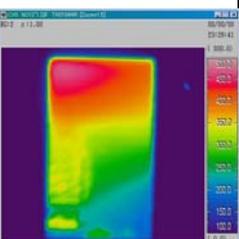
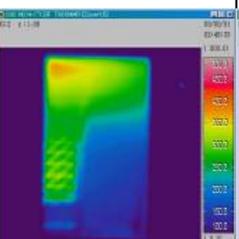
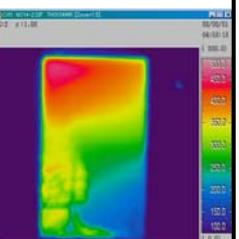
火災室内の温度が降下し始めた時、図1に示したように非加熱側のガラス表面温度は、赤外線温度計によって470°C程度を示した。

b) 赤外線カメラなどによる非加熱側ガラス表面の温度計測結果

2004 年度

実験No. ガラス 測定方法 測定値 (°C)	1 耐熱結晶化ガラス 接触温度計 280°C	2 耐熱結晶化ガラス 接触温度計 283°C	3 耐熱結晶化ガラス 接触温度計 測定無し	4-1 耐熱結晶化ガラス 接触温度計 測定無し
実験No. ガラス 測定方法 測定値 MAX	4-2 耐熱結晶化ガラス 赤外温度計 430°C	5 網入りガラス 赤外温度計 470°C	6 低膨張防火ガラス 赤外温度計 355°C	7 耐熱強化ガラス 赤外温度計 350°C
				
実験No. ガラス 測定方法 測定値 MAX	8 低膨張防火ガラス 赤外温度計 470°C	9 耐熱強化ガラス 赤外温度計 478°C	11 耐熱強化ガラス 赤外温度計 470°C	
				

2005 年度

実験No. ガラス 測定方法 測定値 MAX	12 耐熱結晶化ガラス 赤外温度計 505°C	13 低膨張防火ガラス 赤外温度計 470°C	14-1 耐熱強化ガラス 赤外温度計 385°C	14-2 耐熱強化ガラス 赤外温度計 460°C
				

5.3 考察

1) 実加熱した防火ガラスの非加熱側への水球衝突による破壊状況の分析

今回の実加熱実験で用いた防火ガラスのうち、耐熱強化ガラスのみが非加熱側への水球衝突によって破壊した。その挙動を高速度カメラで撮影し、その画像をもとに解析した。

ガラスは、厚み 8mm で、幅 1.2m、高さ 1.9m である。ガラスの上部は、およそ 600°C、下部は数十度に加熱された。この条件で、500°C 程度の部分を水により急冷却した。水は、150°C 以上の熱面に接触するので初期には膜沸騰が起きる。熱面の温度降下に伴い核沸騰に移行する。

実験に用いた高速度カメラの撮影速度は、2000 コマ/秒と 400 コマ/秒である。コマ間隔は、0.5 m s と 2.5 m s である。実験に用いたガラス中の弾性波速度は、およそ 6000 m/s である。実験に用いたガラスの高さ 1.9m を弾性波が伝ばする時間、 τ [s] を計算する。

$$\tau = 1.9 / 6000 = 3.2 \times 10^{-4} \text{ [s]} \quad (1)$$

τ は、コマ間隔の 60% 程度である。ガラス中の弾性波伝ば過程は、最良の条件でひとコマ撮影できる。

最初に水がガラスに触れてからガラスが破壊するまでの時間は、400 コマ/秒の高速度カメラ画像からおよそ 1.4 秒であることがわかる。ガラスの温度伝導率、 ν [m²/s] は、およそ 0.5×10^{-6} である。この間にガラス中に発達する温度境界層の厚み、 d [m] を計算する。

$$d = (0.5 \times 10^{-6} \times 1.4)^{1/2} = 8.4 \times 10^{-4} \quad (2)$$

d は、1mm 以下であることが分かる。水の散布に伴う温度境界層は、ガラスと水の接触部直下深さ 1 mm 以下の領域に限られる。

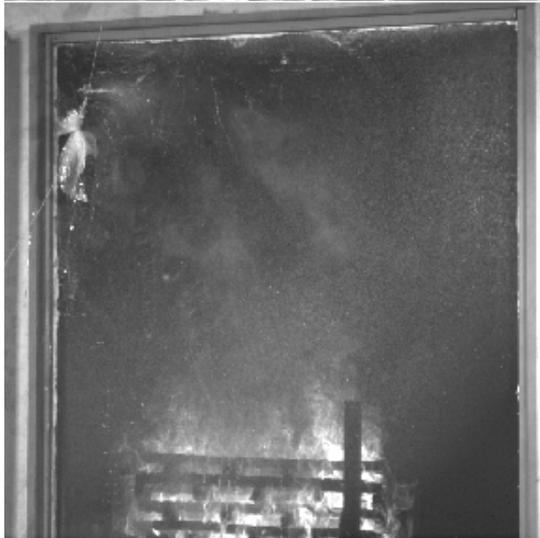
この温度境界層の生成によりガラス中に応力場が形成され、ガラスの破壊が引き起こされる。ガラスは、透明物体であるために、照明を用いてもその形状を可視化することは出来ない。ガラスは、光の強度に影響を与えない。しかしながらガラスは、光の位相に影響を与える。ガラスの面の傾斜や内部に生じた欠陥は、照明条件によっては可視化される。高速度カメラ画像には、弾性波の伝ばに伴うガラスの面形状変化と内部欠陥分布変化が記録されている。高速度カメラ画像には、これらに加え下限の炎のゆらぎ、照明光のゆらぎ、冷却用散布水の映像などがふくまれている。弾性波の伝播速度が、大きいことからコマごとの画素輝度の差を求めると速度の大きい弾性波の伝ばに伴う変化が主として残る。図 1 に示すガラス破壊前後の画像を見ると画面の右側に弾性波の伝ばに伴う変化が明瞭に現れている。この部分を図 2 に示すような位置で画素輝度の時間変化を図 3 に示す。図の横軸は、ガラス破壊時刻からの時間である。P1 から P11 では、 $t=0$ 付近で急激な変化が生じている。一方、P12 から P15 では、緩やかな変化が生じている。P12 の高さは水の散布高さにはほぼ一致している。この実験では、高さ方向にガラスの温度分布が生じている。そのため、この輝度変化挙動の差が、ガラスの温度分布の影響なのか、弾性波の伝播方向の影響なのかかわからない。P1 から P11 の $t=0$ 付近の変化を見ると P1 における変化が最も遅く、弾性波が上部から下部に伝ばしたと推定できる。

ガラスの二次元的な破壊挙動を調べる目的で、高速度カメラ画像のコマごとの差分画像の輝度の空間二階微分の大きい画素を二コマ重ね図4に示す。 $t = -0.0005$ s の画像をみると炎のゆらぎと水滴が見える。 $t = 0$ の画像をみるとガラスの広い範囲に変位が見える。水の散布高さより上には、大きな連続的な変位が散布点の近傍に現れている。一方、水の散布高さより低い部分には、細かな変位が広く現れている。 $t = 0.0005$ s の画像には、ガラスの右下と左下に細かな変位が現れている。 $t = 0$ の画像に、画像の変化に応じ、区分した図面を図5に示す。

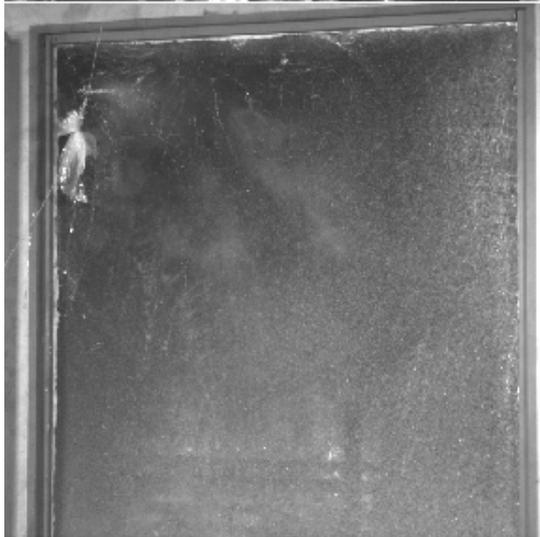
大きな連続的な変位に囲まれた部分 I、大きな連続的な変位が現れた部分 II、細かな変位の現れた部分 IV に分けした。水が散布された部分を W1 と W2 で示す。部分 I は、水平方向で見ると部分 W1 と部分 W2 に挟まれた領域内に含まれている。図5を見ると部分 W1 と部分 W2 に生じた圧縮応力によって部分 I、部分 II に応力が集中し、部分 II 内で外側への正味の応力が放射状の亀裂を生じさせたように見える。残念ながら今回用いた高速度カメラの撮影速度では、破壊過程が一枚しか得られなかったものでこれ以上の解析は出来ない。



$t = - 0.0005 \text{ s}$



$t = 0 \text{ s}$



$t = 0.0005 \text{ s}$

図1 ガラス破壊前後の画像

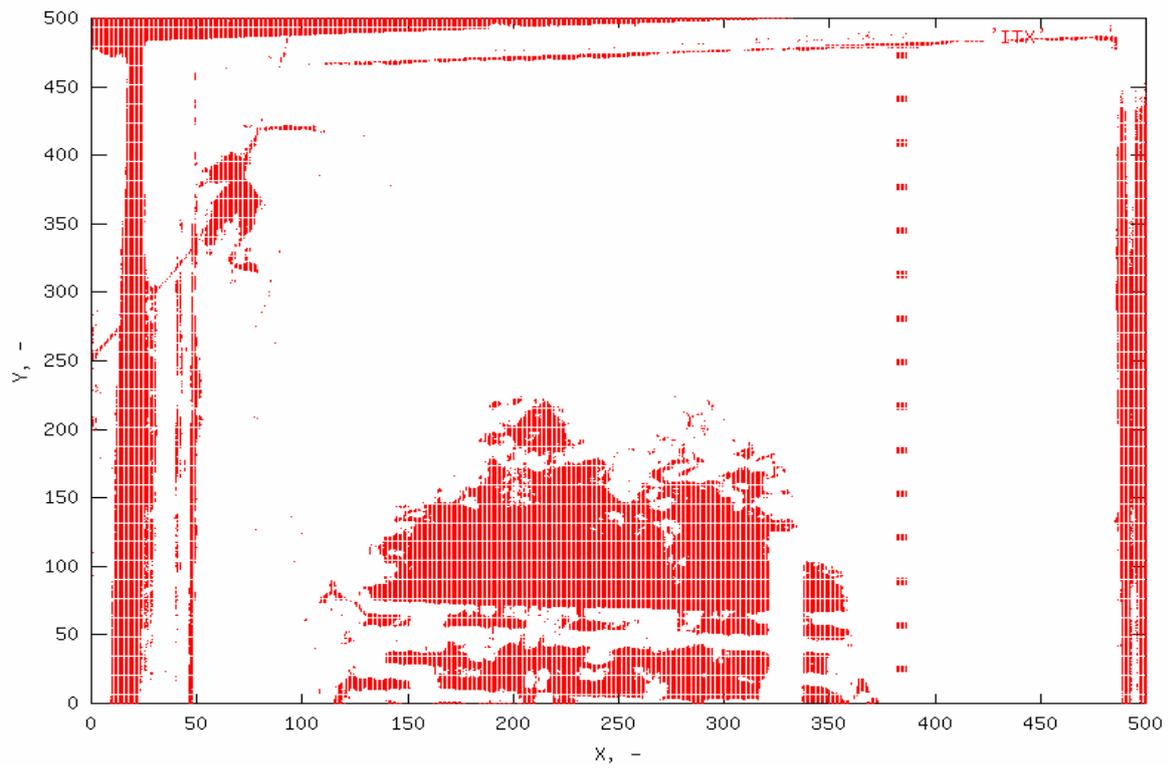


図2 画素輝度計測位置

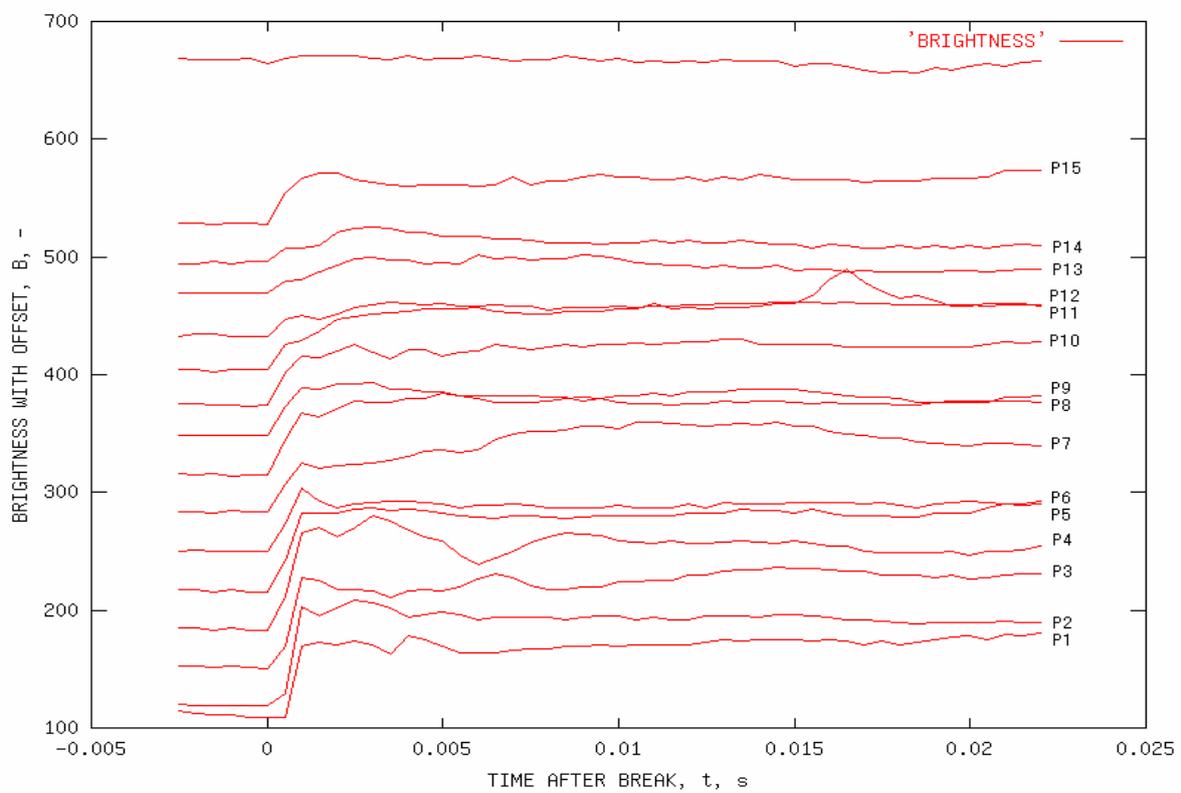
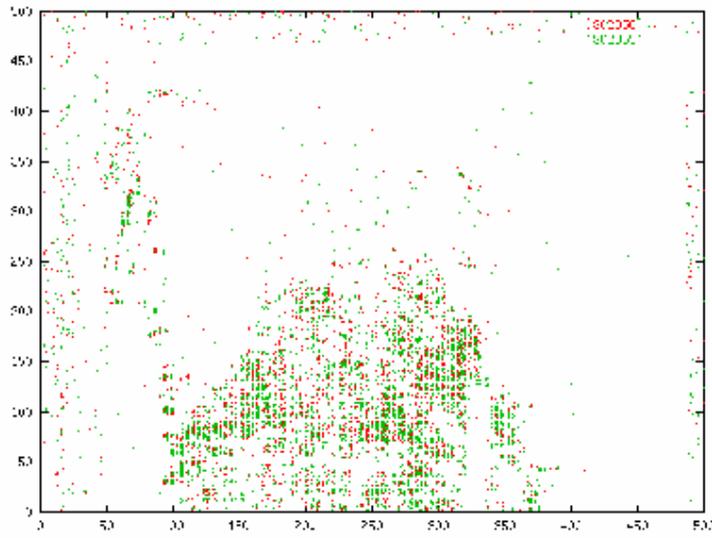
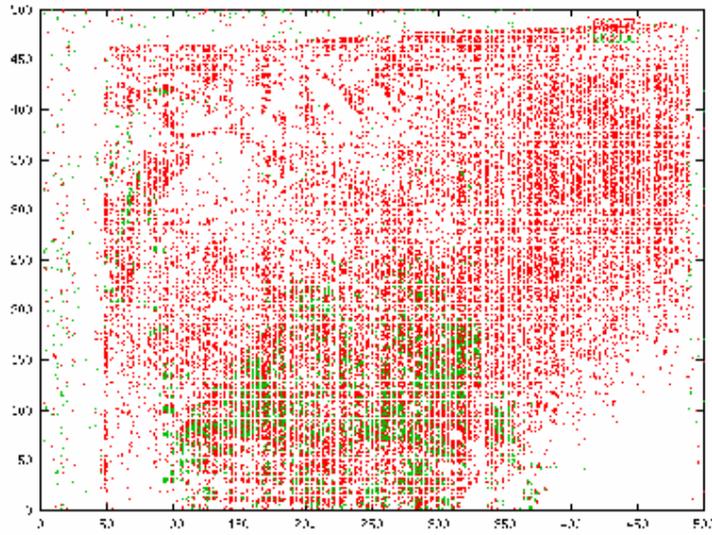


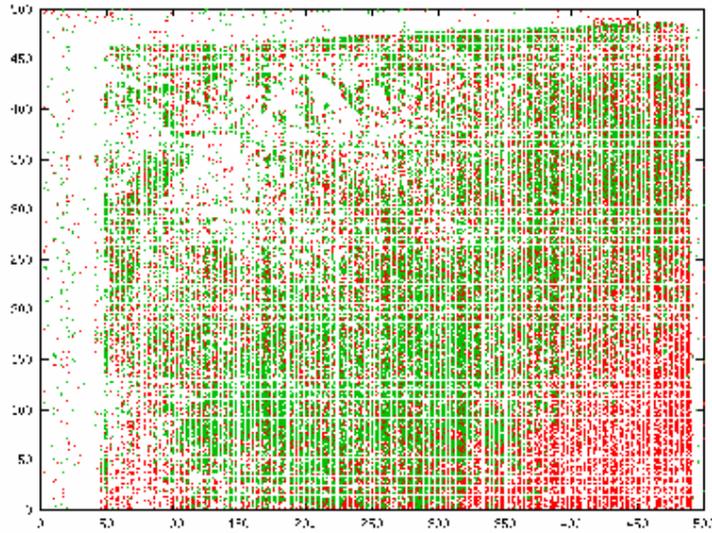
図3 画素輝度の時間変化



$t = -0.0005 \text{ s}$



$t = 0 \text{ s}$



$t = 0.0005 \text{ s}$

図4 差分画像の輝度空間二階微分

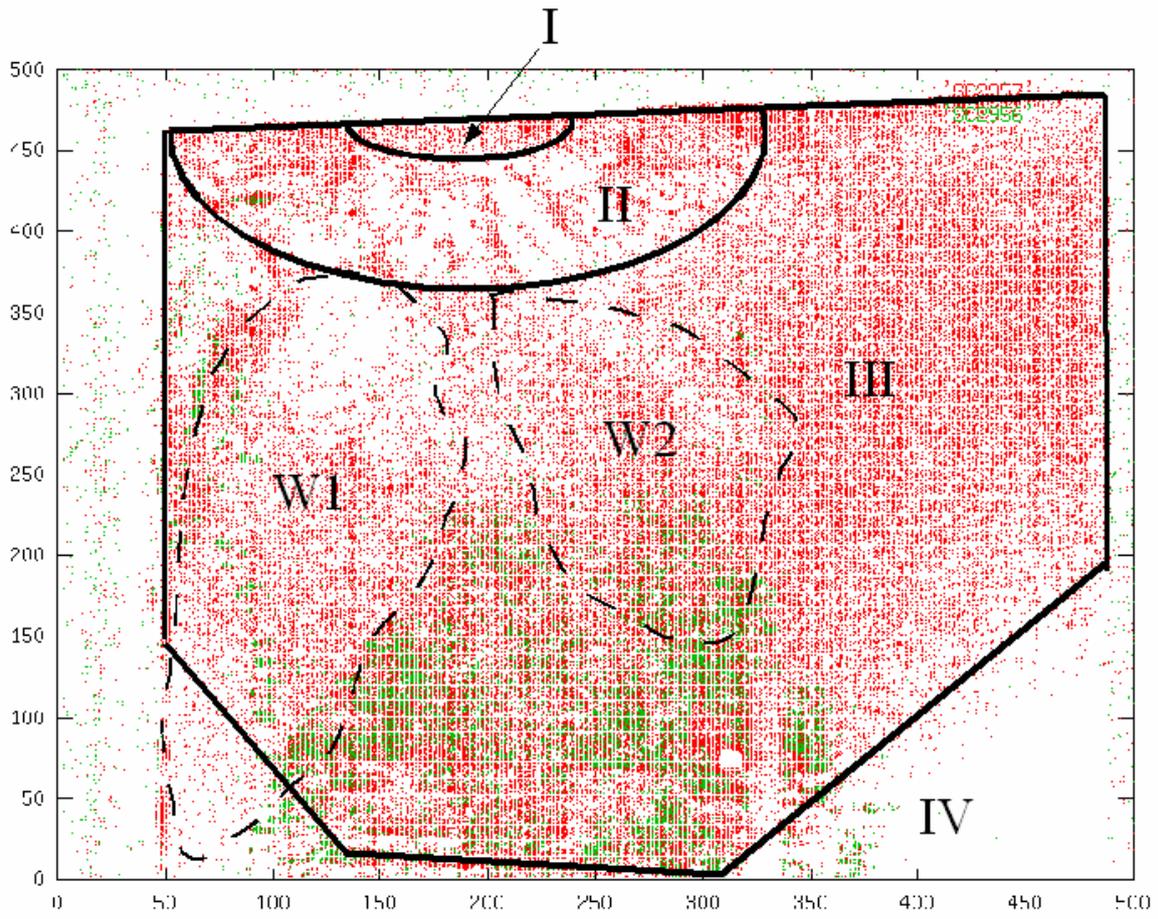


図5 画像の変化に応じ、区分した図面

2) 防火ガラスの特性を考慮した適材適所の設計

a. 共通事項：現行の試験方法では適材適所のための情報は提供されていないこと

標準加熱実験で合格した防火ガラスによる特定防火設備であっても、加熱条件や水球衝突などによって、耐熱結晶化ガラスは加熱や水球衝突による変化はなかったが、ガラスによって、以下のようなさまざまな異なる弱点が発生する可能性があることがわかった。

- ・ 低膨張防火ガラスは、水球を衝突させても破損や脱落には至らなかったが、加熱によってガラス面は大きく湾曲した。
- ・ 耐熱強化ガラスは4回の実験においてすべて破損した。1回は、水道ホース放水による。また1回は、水球衝突によりガラスは細かな粒状で破損脱落した。残りの2回は着火から4～8分で水球衝突前に破壊した。このことから、ガラスの高温時における不安定な特性に起因する弱点とガラスと枠材の施工精度に依存する弱点が懸念された。
- ・ 網入りガラスは、ガラスの脱落はなかったが、加熱初期に大きな亀裂を、水球衝突後には更に微細な亀裂を発生させた。

したがって、当該ガラスに関して現行の標準加熱試験による合否判定の制度だけでは不十分であると判断する。

すなわち、従来の鋼製防火シャッターや防火戸のように熱変形や遮熱に弱点があるものの破壊に至ることは稀な特定防火設備と、上記の防火ガラスは、まったく新たな別な課題を有する設備であるといえる。したがって、防火ガラスについては、国の定める基準は最低基準であることを勘案すると、それらの試験方法の改定を提案する以前に、現行標準試験に加え、独自に対象とする空間内外に想定される火災性状を考慮した複数の火災外力条件下での性能試験が必要であろう。さらに放水や風圧などを含む総合的な性能試験を再現しない限り、その被害状況の大小は別として、このような不都合なことがらが埋没してしまう恐れがある。

これら不足する情報について、自主的な情報として、業界は組織的・体系的な実験的な検討を進め・整備して、設計者やユーザーに対して発信することを期待する。

加えて、それぞれのガラスが持つ弱点を補う方法について、それを隠すのではなく、その利点を生かした解決策について各社が真摯に検討することが望まれる。

b. 限られた実験結果に基づく適材適所の設計

今回の限られた実験個数から、これらの材料の適材適所を考察すると以下のとおりである。

- ・ 耐熱結晶化ガラスは、標準的な加熱条件だけではなく、実際に近い(火災初期のように空間内部の上下に温度差があることが多い)加熱条件の加熱や急冷に対しては極めて安定した性質を示した。したがって、遮炎性ならびに消防活動時の放水による急冷の観点からみれば、現在使用されている空間に想定されるさまざまな火災に対して特別の制限はない。しかし、このガラスはフロートガラスと同程度の強度しかないことに特段の留意が必要である。
- ・ 低膨張防火ガラスについては、今回の実験の範囲では湾曲による脱落はなかったが、ガラス寸法が大きくなるにつれて湾曲も大きくなり、枠からの脱落や拘束の如何による破損などが懸念される。また、このガラスも強化ガラスに属することから、今回の加熱条件以外の条件では異なる挙動を示し破損する可能性は潜在すると考える。したがって、使用環境

に想定される火災とガラス寸法などに対して当該ガラスがどのような挙動を示すか確認した上で使用限界を明らかにする必要がある。

- ・ 耐熱強化ガラスは、低膨張防火ガラスより熱強化の度合いの大きいため、結果として上に示したようにさまざまな条件で破損した。したがって、一般に火災は標準加熱の状態になる以前に、今回実施したような状態を経ることを考慮すると、早急に何らかの改善策を付与する必要がある。改善の方向としては、ガラス自身の改善と施工法の改善の組み合わせとなると考える。例えば、ガラス部分の改善として合わせガラスとする、小さなガラス寸法とする、施工方法の確実さについての見直しを図るなどが必要であろう。あるいは現状のままであることを前提とすれば、標準加熱試験とまったく同様な、高さ方向に温度分布の少ない火災が起きる可能性が高い空間のみに使用場所を限定し、かつその施工に際しても、標準試験に合格した施工方法（例えばアンカーピースの位置、呑み込み寸法やバックアップ材、押し縁の締め付け強さなど）とガラス寸法の範囲に使用を限定するの二者択一と考える。
- ・ 網入りガラスは、火災発生から極めて早い時期に亀裂が入ることから、火災規模の拡大により金網が切断、溶融するなどの異常が出るような可能性を有する場所などへの使用は制限すべきである。

c. 適材適所のための共通補足事項

これら防火ガラスは、遮炎性能は達成できるが、あるレベルの透明性や視認性を期待していることから共通の性質として遮熱性（放射遮断性を含む）に弱点を持つことを忘れてはならない。このことは、これらのガラスに接して物が置かれるような場所への利用はおのずと制限されるであろう。少なくとも片側は廊下やアトリウムなど火源や可燃物がない用途であることが望ましい。特に、避難経路として重要な場所、例えば避難階の出入り口に近い部分や、避難階段、附室、などの近傍で、人が滞留する可能性のある場所では、遮炎性に加えて、遮熱性能のあるガラスを用いることが望まれる。

6. 消防活動の安全性から見た防火ガラス

6.1 ガラス防火戸が存する防火区画について

(1) 利点

(ア) 区画内部の火災の状況や要救助者の有無が容易に確認できる。

区画内で火災が発生した場合、透明性の高いガラスが区画部分に使われているため、区画内部の火災の状態がどのようになっているか、区画内の什器や可燃物の配置がどうなっているか、区画内に取り残されている要救助者がいるかどうか、などが容易に確認できる。それに伴い、消火や救助の活動準備を適切に行える可能性が高い。

(2) 懸念材料

(ア) 遮炎性能が試験内容の通り、一定時間確実に維持されるのか。

標準試験法では、試料となるガラスの全面を均一に加熱する方法をとっている。ところが、実火災を想定すると、区画内の上部と下部では温度勾配ができ、不均一な加熱となる。ガラスは組成から固有の膨張率を有する。そのため、温度勾配ができるとひずみやゆがみが発生し、破損にいたる。また、その膨張率はガラスの種類により違うため、破損に至る温度条件も違うと予想できる。火災のように不均一な加熱が行われる場合でも、破損せず期待通りの遮炎性能を維持する必要がある。

(イ) 消防資器材の接触によるガラスの破損が発生しないか。

隊員の活動においては、空気ボンベ、ヘルメット、放水ノズル、破壊器具などを所持する。活動中、注意をしていたとしてもガラスにこれらの装備品がぶつかることが予想され、このときにガラスが破損してしまうと、防火区画が破壊され、隊員が火炎に曝されたり、延焼拡大の経路を作ることになる。このことから、熱の影響がある場合とない場合の両方で、ガラスの機械的な衝撃に対する強度が、活動中の衝撃に耐える強さを持つ必要がある。

(ウ) 放水による機械的な衝撃や熱的な衝撃によりガラスが破損しないか。

火災区画の外側から防火ガラスに向けて放水する消火活動はないが、区画内に放水したときに向かい側の防火区画部分にある防火ガラスに放水が到達することは予想される。このとき、2つの衝撃がガラスに加わる。一つは水がガラスにぶつかる機械的な衝撃、もう一つは水による急冷が起こることによる熱的な衝撃である。ガラス自体が熱による影響を受けた状態で機械的な衝撃が加わるため、常温での放水とは違った挙動をガラスが起こすことが予想される。また、熱的な衝撃は、加熱されているガラス面に水があたることになるため、非常に大きな温度勾配が生じることになり破損しやすくなる。放水により区画が破壊されてしまうと、延焼拡大につながり、被害を拡大させてしまう。防火ガラスは、放水により区画が破壊されない性能を持つ必要がある。

防火戸は、消防隊の屋内進入ルート上にある主要構造物で、火災状況によって時間の差異はあるものの、一定時間火災の拡大防止を図るものである。加熱により防火ガラス戸自体が破壊されることは、耐火建物の内部区画は容易に破壊されないと認識している消防隊員にとっては予期せぬ事態であり、重大事故につながる恐れがある。

検索救助のための屋内進入は、援護注水のもと実施するが、火炎に熱せられた防火ガラス戸に放水が衝突した場合、注水圧力により容易に防火ガラス戸が破壊され、室内にあった火炎が吹き返す恐れがある。さらに、本実験では、ガラス面温度が上昇した後に水のうを衝突させ破壊する実験を行ったが、消防隊の放水圧力は比べられないほど高いものであるため、破壊の懸念がある。

(エ) ガラスの光透過性の良さが消防隊員に影響を与えないか。

防火ガラスは通常のガラスと同様、光をほとんど透過させる。5～6mm 厚のガラスで可視光透過率は 90%前後となっていて赤外線もほぼ同様と考えれば、火炎や高温物体からの輻射が透過してしまうことになる。ガラスの傍に可燃物があつたとしたら、輻射熱の影響で温度が上昇し燃焼へと移行し、火災拡大へと向う。また、隊員がいた場合には輻射を受け、思わぬ熱傷や熱中症になることも考えられる。輻射を遮るガラスとして、ガラスを複数枚使用して間にケイ酸ソーダ層や特殊ゲルを挟み込んだガラスが市販されている。これらのガラスは高温になると充填材が発泡白濁し放射を遮る働きをする。防火区画部分では、延焼拡大を防止し隊員を火炎からの輻射から守る性能が必要である。

また、防火ガラス戸は一般的なフロートガラスと同様な透過性能を有していることが多く、面体や防火帽の顔面保護板（フード）を通して見たときは視界が多少悪くなることから、ガラスの透明性が高いと進入隊員は何もないと判断し衝突する危険がある。

(オ) ガラスが破壊したとき消防隊員や要救助者が受傷することはないか。

炎からの熱や消防隊の消防活動により、防火ガラス戸が破壊された場合に、ガラスの破壊面は鋭利であり消防隊員が破壊面に接することにより、切創などの受傷事故が発生する恐れがある。加熱される前の強化ガラスは割れたときに細かな粒状に壊れるが、加熱され応力が解放されると一般的な板ガラスと同様な破壊形態になり、鋭利な破片ができる。

6.2 2005年6月の燃焼実験について

水をかける前に熱的な衝撃で割れてしまったガラスがあつた。このガラスは2回実験を行ったが、点火から割れるまでの時間が約4分と8分というように異なつた。温度の変化を細かく追つてはいないが、燃焼区画が同一でクリブの重量と形状もほぼ同じことを考えると、クリブ自体の燃焼性状にはそれほどの違いはなかつたと考えられる。

ガラスが割れたときの計測データを見ると、加熱面側室内上部の温度は 629℃と 635℃、ガラスの非加熱面側は 385℃と 460℃となつていた。これらから割れたときのガラスの温度条件はそれぞれ違つたと考えられる。このガラスは 2004 年度の実験では水をかけたときに割れていて、このように、防火ガラスとして売られているもので同一製品でも品質にばらつきがあると思われる。

防火ガラスは、実火災に近い温度条件で一定の性能を確保するような製品であつてほしいし、標準試験も実火災の温度分布を考慮した方法を取り入れるべきである。また、予防業務上、防火ガラスが特性に応じていろいろな挙動を示すと云うことを前提に、設置位置の指導基準というものを検討する必要があるが、そもそも鋼製の防火戸を念頭においた評価基準で「割れる可能性のある」ガラスを含めて認定する妥当性について検討が必要と考える。

6.3 防火ガラスの使用方法等について

これまで、実験や資料等をいろいろと見てきたが、ガラスを用いた特定防火設備にも、各メーカーでガラスの強度や耐火性が一長一短で、資機材の衝突などによる対衝撃性は高いが散水による温度変化等には弱いもの、また、膨張率を抑えて散水による温度変化等に対しては強いが強度はフロートガラス並みのものなど、特性が異なる。

火災時の活動を考慮すると、防火ガラスがある現場で消防がどのように活動の判断を行うかが重要になる。ガラス戸の一か所に大臣認定シールが貼られることになっているが、ガラスごとの特性として区別や記述がされていないため、実際の消防活動上では特性に応じた活動はほぼ不可能という状況である。

消防活動上は問題となる部分が多いが、ガラスにも性能的な特徴があることから、その特徴を生かす用途でガラスを使い分けていくことが必要である。以下に、建物内での使用方法で考慮すべき点をあげてみる。

- ・ 区画内の状況を確認しやすくすることから、部分的に透明なガラスを入れて視認性を確保することは有用である。しかし、広い面積の部分や避難経路として重要な場所、例えば避難階の出入り口に近い部分や、避難階段、附室、などの近傍で、人が滞留する可能性のある場所では、遮炎性に加えて、遮熱性能のあるガラスを用いることが望まれる。
- ・ 消防隊からすると、防火区画は、消防活動中は火災の熱で破壊されないものという認識がある。特に、耐火建築の防火区画内の火災は、区画が破壊されなければ、区画外へ延焼せず、放っておけば鎮火するものと考えている。機械的な衝撃や熱的な衝撃にも耐え、輻射も遮断できるようなガラスであれば防火区画を形成するのに適している。

7. 今後の課題

今回の実験より防火ガラスによっては、火災拡大の状況や消防活動時のホース放水などで、区画部材としての所定の性能を確保できないものがあることを見出した。

しかし、限られた条件下での実験であるため、適材適所の設計と消防隊の安全確保の資料を得るためにはさらに系統的な実験の積み重ねが必要である。

今後の検討課題としては、以下がある。

7.1 技術的な課題

1) 実火災条件下における防火ガラスの挙動解明

今回実験した火災は、限られた空間構成と火源条件での結果である。ある種の条件が組み合わされると国土交通省の定める試験に合格した防火ガラスであっても、防火区画としての性能を維持できなくなる可能性があることを指摘したに過ぎない。また、破壊の可能性の有無を事前に予測することの困難性も確認できた。したがって、系統的な条件下での実験を継続することが重要と判断した。

2) ガラス単体及び部材として的高温時挙動の解明

実物大での実験には、膨大な費用と時間が必要である。したがって、今回提案したような小部材でのガラス単体的高温時の特性把握のための試験方法の充実や、さらにはガラスと枠の納まりの組み合わせを評価する試験方法の開発など、基礎的な準備が必要である。

また、系統的な実験の結果と小規模部材での実験結果を有効に結び付けることにより、安全設計という意味でのガラス破壊の可能性を簡易に予測する実験式の確立も望まれる。

3) 消防活動や避難活動へのガラス破損の影響評価

本実験のようにガラスが破壊した場合、避難者や消防士への影響度合いがどれほどあるのかを確認することも大切な課題である。これに関しては、平成 17 年度の研究で実際に消防活動経験のある東京消防庁消防科学研究所の参加を得て、検討に着手を開始した。今後期待するところである。

4) 適材適所の設計法の充実

本研究の目的は、このようなガラス部材の適材適所の設計資料を得ることにより、安全設計に役立てようとするものである。しかし、前述のとおり、今回の実験だけからはそれら各課題について定量的に安全な使用条件を示すことはできておらず、今後さらなる検討が必要である。

7.2 施策的な課題

1) 不合格情報の精査

これまで実施された防火ガラスの多数の不合格データを、精査することの意義は、新たにさまざまな加熱環境での実験を体系的に行うことに以上に大きいと判断する。すなわち、破損や脱落の原因となる条件を分析することによって、それぞれの材料の使用限界を導ける可能性は大きい。このためには、申請者間の企業秘密や試験機関と申請者間の守秘義務契約というハードルを取り除くことが肝要で、申請者自身が、自らのマーケットに内在するリスクを取り除くために、真摯に安全のために情報開示する時代が早く来ることを望むものである。

2) 自主試験法の開発と情報公開

今回の実験で見られたように、防火ガラスによっては低膨張防火ガラスや耐熱強化ガラスのように温度上昇によって、常温時と高温時で、その特性値がまったく別物のように容易に変化する材料を、単に標準試験に合格したことを持って建築空間のどのような部分にでも使用を許可する、現行の認定制度に疑問が残る。追加試験方法の確立、新しい認定制度の制定、法改正に至るまでには、国や試験機関にそのような要求を提出しても非常に時間が掛かることは、これまでの事例で容易に推察できる。また、このジャンルのガラスを用いた空間で火災が発生し、今回の実験で得たような事象が再現された場合、「全ての防火ガラスの認定取り消し」という短絡的な結論に至ることも考えられる。あるいは、新しい追加試験方法を確立するまでの使用停止などの措置がとられることになるであろう。これら防火ガラスには、今回示した弱点が潜在する可能性があるものの、平常時には窓として反対側の様子がハッキリ分かるという、大きな利点（設計者を含め、エンドユーザーが期待する要求）を有するため、せっかく確立したマーケットを閉鎖させる懸念をそのまま放置することは適切ではない。

したがって、これらのガラスに固有の課題を評価できる自主的な試験法の開発が緊急の課題であると考えられる。そしてそれらの結果をきちんとユーザーに情報公開することが肝要である。

防火ガラス比較一覧

会社名		日本電気硝子	旭硝子	日本板硝子	旭硝子、日本板硝子、セントラル硝子
一般名		耐熱結晶化ガラス	低膨張防火ガラス	耐熱強化ガラス	網入磨き板ガラス、網入型板ガラス
商品名		ファイアライト	ピラン	パイロクリア	ヒシワイヤ、クロスワイヤ(旭硝子) 菱形ワイヤ、クロスワイヤ(日本板硝子) 菱形ワイヤ、角型ワイヤ(セントラル硝子)
素板の種別		リチウムアルミナ珪酸系	ほう珪酸系	ソーダ石灰系	ソーダ石灰系
熱特性	熱膨張率 ($\times 10^{-6}/K$)	-0.3	3.3	8.5	8.5
	軟化温度	約900℃以上	約800℃以上	約720℃	約720℃
	熱伝導率 (Kcal/mh℃)	1.51(25℃)	0.96(ショット社データ)	0.86	0.86
光特性	可視光線透過率(%)	5mm	87.0		
		6.5mm		92.1	
		6.8mm			82.3
		8mm	85.0		87.7
		10mm			79.0
	屈折率(n)	1.54	1.49	1.52	1.52
物理特性	耐風圧強度 許容荷重(N)	5mm	3375		
		6.5mm		10237	
		6.8mm			4406
		8mm	7200		25,200以上
		10mm			8400
	比重	2.51	2.2	2.5	2.5
	ヤング率 ($\times 10^5\text{kgf/cm}^2$)	9.0	6.4	7.3	7.3
モース硬度	約7	約6	約6.5	約6	
最大寸法(mm)	5mm	1200×2400			
	6.5mm		2000×3000	2000×2400	
	6.8mm				2400×2400且つ4.8㎡以下(防火設備)
	8mm	1200×2400		2000×3000	
	10mm				3000×3000且つ7.2㎡以下(防火設備)
主要板厚		5ミリ・8ミリ	6.5ミリ	6.5ミリ・8ミリ	6.8ミリ・10ミリ
エッジ加工の必要性		無し	有り	有り	無し
ガラスの色調		薄い琥珀色	ソーダライムより青みが少ない	フロートガラスと同等	フロートガラス同等
反射映像		磨き板ガラス程度	強化ガラス程度	強化ガラス程度	磨き板ガラス程度
現場での切断加工		○	×	×	○
破砕形状		フロートガラス同等(放射状)	フロートガラス同等(放射状)	強化ガラス同等(粒状)	フロートガラス同等(飛散防止機能有)

・データの数値は各社カタログ参考値より抜粋。

【付録2 防火ガラスにおける物理強化と機械的強度について】引用：ガラス工学ハンドブック

1. 防火ガラスにおける物理強化（風冷強化）

1.1 風冷強化方法とは

ガラスの軟化温度まで加熱されたガラスを急冷し、常温になった状態でガラスの厚み方向に残留応力を発生させ、表面に圧縮応力層を形成した強化方法。

1.2 原理の説明

通常、面的にガラスを加熱すると表面相温度は内部層温度よりも高くなり、この際に発生する熱応力は表層が圧縮、内部が引張りであり、ガラスの破壊は無い。次に、表層と内部の温度差がなくなった段階で、両面から一様に冷風にて冷却すると、加熱時とは逆に表層温度が内部より温度効果が早く、熱応力は表層が引張りで内部が圧縮になる。

しかし、ガラスの温度が歪点以上にある場合は、熱応力は殆んど瞬時に緩和消失し、応力が無い状態になる。更に、冷却率を一定にして表層と内部の温度を一定にして保つと、ガラスは応力の無い状態で温度降下し、板ガラス全体が等温の室温状態になった時、高温時の表層と内部の温度差に起因する熱応力を緩和した分だけ符号が変わって、板ガラスの表層に圧縮応力、内部に引張り応力が存在する。

1.3 最大温度差の誘起する熱応力（F）

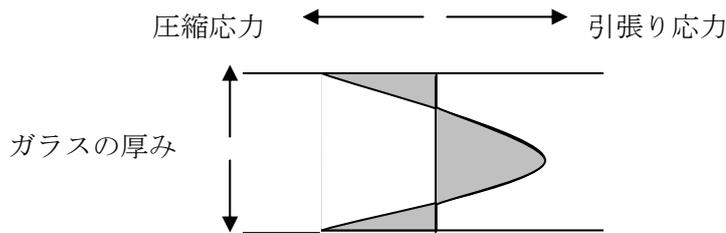
$$F = (\alpha E / 1 - \sigma) \times 2 / 3 \times \Delta T$$

α : ガラスの膨張係数
 E : ガラスのヤング率
 σ : ガラスのポアソン比
 ΔT : 最大温度差

* 熱応力Fは室温における表面層に現れる圧縮応力に等しい

1.4 風冷強化の特徴（応力の入り方）

表面の圧縮応力：100～200MPa



引張り応力=約1/2圧縮応力

圧縮応力層=約板厚の1/6（片側）

1.5 風冷強化品の破壊

- ・引張り応力層にガラスの傷が到達すると、クラックは表面より速く進み、このクラックは引張り応力が大きいほど加速され、激しく分岐し、分岐した新しい破面を起点とする二次破壊が起こり破壊密度は高くなる。その時の、伝播速度は約1500m/秒とされている。
- ・破壊は、ガラスに負荷される引張り応力が、ガラスの強度を超えた時に起こる。尚、そのオリジンはガラス表面である。

2. 防火ガラスの熱に対する強度（破壊）について

2.1 風冷強化品の強度

機械的曲げ強度：150～250MPa（通常品＝約 50MPa）

熱衝撃強度：全体急冷で約 180℃（通常品＝約 60℃）

部分急冷で約 250℃（通常品＝約 150℃）

2.2 各種防火ガラスの熱による概略発生応力（ ΔT の温度差が発生した場合の発生熱応力 MPa）

表 1. 防火ガラスの ΔT による発生応力 F

（1.3 の式による概略値）

	耐熱結晶化ガラス ファイアライト	低膨張防火ガラス ピラン	耐熱強化ガラス パイロクリア
膨張係数	-6 ~ -3	3 2	8 8
ヤング率	8 8 GPa	6 2 GPa	7 2 GPa
ポアソン比	0.24	0.19	0.23
許容応力	5 0 MPa	1 0 0 MPa	2 0 0 MPa
ΔT			
100℃	5	3 0	6 0
300℃	1 0	8 0	1 7 0
500℃	2 0	1 3 0	2 8 0
600℃	2 0	軟化発生	軟化発生
700℃	2 0		

*ヤング率は、高温になるほど低下する（300℃で約 20%低下）が、上記では考慮していない。

表 1 から

- 耐熱結晶化ガラスは、熱膨張係数が 5 付近である事からガラスに 700℃の温度差が生じても、約 20MPa の熱応力しか発生しない。ガラスの許容応力以下であり、破損は無い。
- 低膨張防火ガラスは、ガラスに 400℃付近の温度差までは許容応力以下の熱応力であり、破損は発生しにくい。しかし、500℃付近以上になると許容応力以上となり破損が発生する。さらに、500℃付近以上になるとガラスの歪点を超えて表面層の圧縮応力が緩和され始める。その結果、許容応力が通常品の約 50MPa にもどり、破損の確率が高くなる。
- 耐熱強化ガラスは、熱膨張係数が高いためにガラスに 400℃付近の温度が生じると許容応力を超えて破損が発生しやすくなる。さらに、徐々にガラスの歪点に達し許容応力が低下することにより、破損の確率が急激に増す。

13	4.7	306	74	4.8	286	68
14	4.7	438	107	4.7	306	75
15	4.7	347	85	4.7	255	62
16	4.7	622	150	4.7	642	157
17	4.7	214	52	4.7	337	80
18	4.7	398	97	4.7	683	166
19	4.7	306	74	4.7	286	69
20	4.7	449	109	4.7	408	100
21	4.7	214	52	4.7	326	79
22	4.7	387	95	4.7	469	114
23	4.7	286	70	4.7	387	95
24	4.7	449	108	4.7	602	143
25	4.7	418	102	4.7	438	107
26	4.7	622	150	4.7	734	178
27	4.7	255	61	4.7	296	72
28	4.7	296	72	4.7	275	66
29	4.7	459	111	4.7	286	68
30	4.7	459	111	4.7	459	111
平均値			93.2			94.2
標準誤差			6.3			6.7
標準偏差			34.4			36.5

(フロート板ガラスのポアソン比は0.23とする)

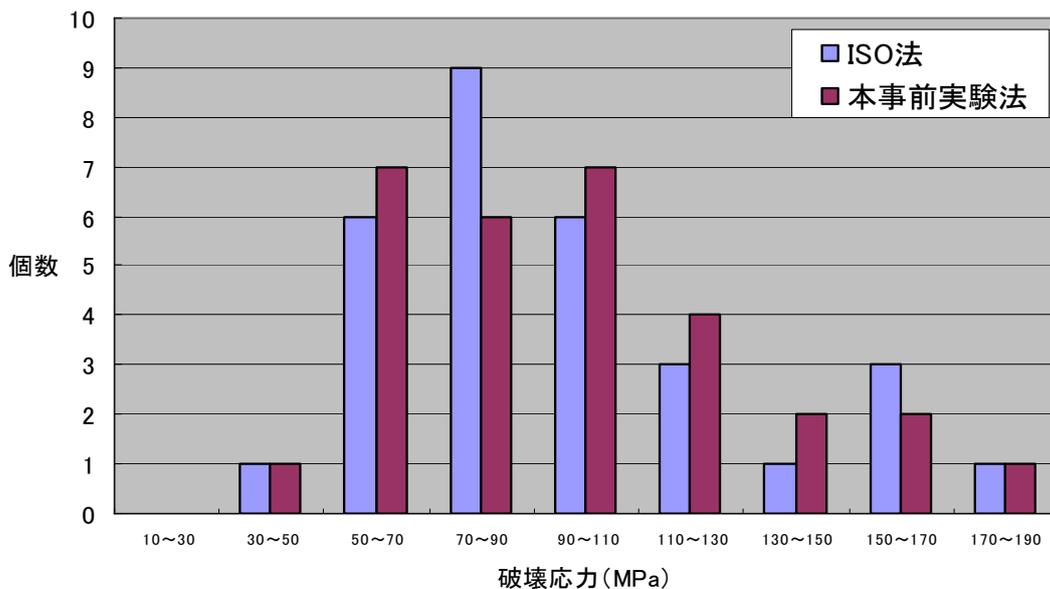
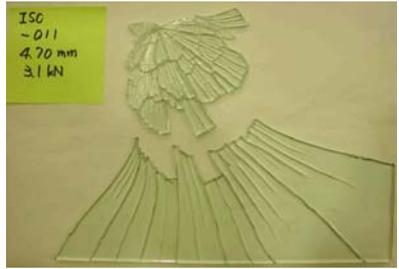
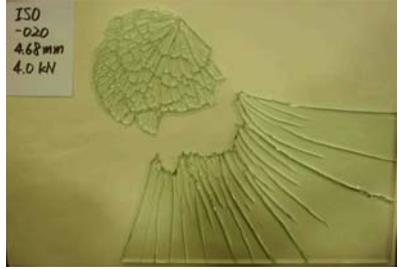
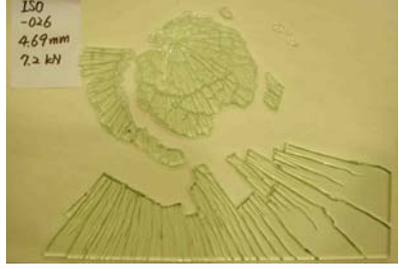


図1 ISO法及び本事前実験法の結果

本事前実験法		ISO 法	
試験写真	データ	試験写真	データ
 <p> 投擲 -007 4.70mm 2.1kN </p>	No: 017 厚さ: 4.7mm 破壊荷重: 214 kgf 破壊応力: 52 MPa	 <p> ISO -012 4.76mm 2.1kN </p>	No: 012 厚さ: 4.8mm 破壊荷重: 214 kgf 破壊応力: 51 MPa
 <p> 投擲 -008 4.68mm 3.0kN </p>	No: 008 厚さ: 4.7mm 破壊荷重: 306 kgf 破壊応力: 75 MPa	 <p> ISO -011 4.70mm 3.1kN </p>	No: 011 厚さ: 4.7mm 破壊荷重: 316 kgf 破壊応力: 76 MPa
 <p> 投擲 -025 4.67mm 4.1kN </p>	No: 025 厚さ: 4.7mm 破壊荷重: 418 kgf 破壊応力: 102 MPa	 <p> ISO -020 4.68mm 4.0kN </p>	No: 020 厚さ: 4.7mm 破壊荷重: 408 kgf 破壊応力: 100 MPa
 <p> 投擲 -005 4.67mm 4.8kN </p>	No: 005 厚さ: 4.7mm 破壊荷重: 489 kgf 破壊応力: 120 MPa	 <p> ISO -002 4.73mm 5.1kN </p>	No: 002 厚さ: 4.7mm 破壊荷重: 520 kgf 破壊応力: 124 MPa
 <p> 投擲 -006 4.70mm 6.1kN </p>	No: 016 厚さ: 4.7mm 破壊荷重: 622 kgf 破壊応力: 150 MPa	 <p> ISO -016 4.67mm 6.3kN </p>	No: 016 厚さ: 4.7mm 破壊荷重: 642 kgf 破壊応力: 157 MPa
 <p> 投擲 -010 4.69mm 7.2kN </p>	No: 010 厚さ: 4.7mm 破壊荷重: 734 kgf 破壊応力: 178 MPa	 <p> ISO -026 4.69mm 7.2kN </p>	No: 026 厚さ: 4.7mm 破壊荷重: 734 kgf 破壊応力: 178 MPa

【付録4 防火ガラスの高温特性把握実験（事前実験3）についての加熱実験】

加熱実験は、図1に示すように熱電対を配置して、加熱時の各点の状況を確認した。熱電対2, 3, 4, 5は試験体両面の温度、6は加力リングの中の試験体表面温度、9, 11は加力リングと支持リングの温度、10は温度調節機の温度制御用熱電対である。

計測の結果、ガラスの表面温度差は20℃以下であった。図2～5に結果を示す。この結果から、加熱炉のニクロム線の配置や断熱方法などが適切であると判断した。

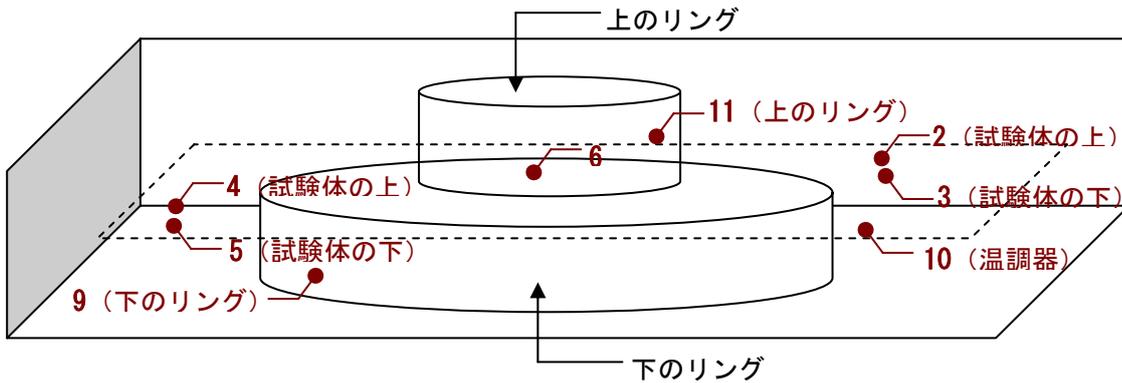


図1 炉内の熱電対位置

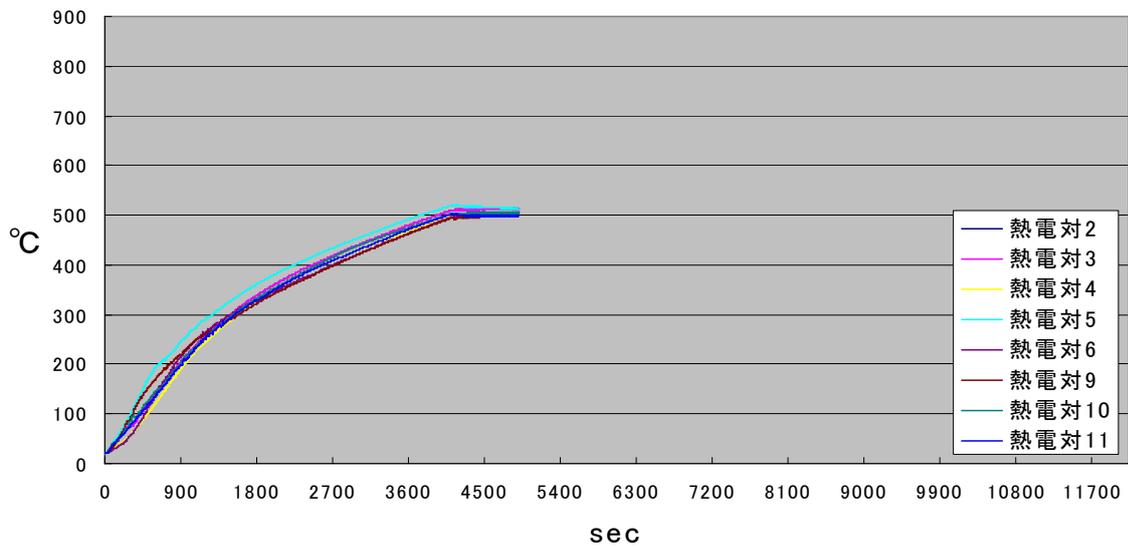


図2 500℃までの加熱

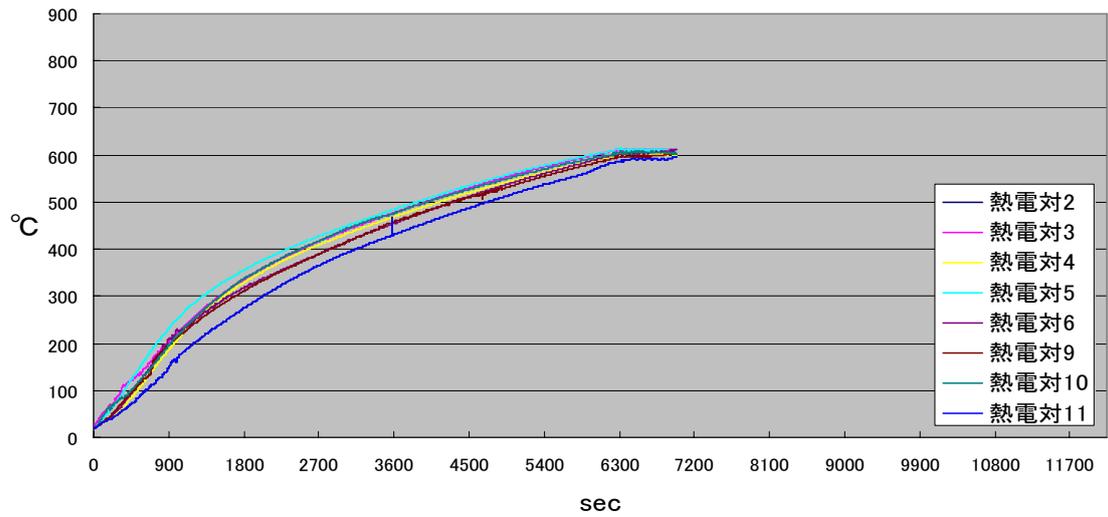


図3 600°Cまでの加熱

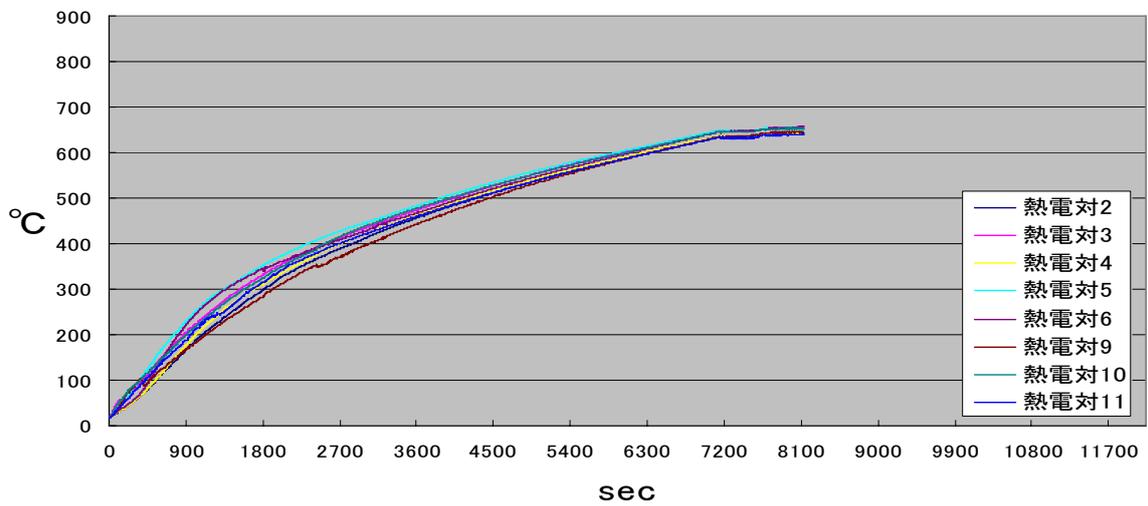


図4 650°Cまでの加熱

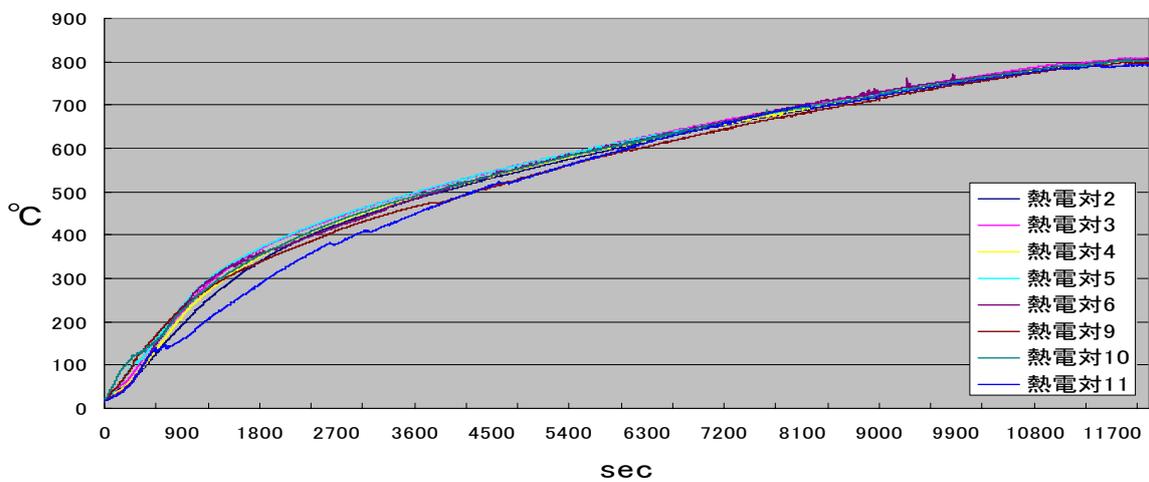


図5 800°Cまでの加熱