

火気設備等の周囲に設置するガラスの安全性に関する検証

菊地 遼輔*, 金子 公平**, 細谷 昌右*

概 要

火災予防条例¹⁾ (以下「条例」という。) で特定不燃材料が定義されているが、ガラス及び瓦は除かれており、火気設備等の離隔距離内に設置することができない。一方、調理中の煙や油が客席に入ることを防ぎ、調理を見せるために、火気設備等の周囲に間仕切りとしてガラスを設置したいという相談を受けることが多くある。

本検証では、ガス消費量 5.8kW のガスこんろとガラス 6 種の間仕切りを用い、火災危険 (ガスこんろ側方 15cm で全熱流束 $\geq 10\text{kW}/\text{m}^2$) 並びに避難障害及び受傷危険 (熱割れ、急冷割れ及びガラス非加熱面温度 $\geq 70^\circ\text{C}$) が生じない条件を模索した。

その結果、低膨張ガラス 6.5 mm、耐熱結晶化ガラス 5 mm 及び 8 mm は、一定の条件の下、間仕切りとして安全に設置可能であることが分かった。

1 はじめに

条例に定める特定不燃材料は、建築基準法第 2 条第 9 号に定める不燃材料からガラス及び瓦を除いて運用されている。これは、ガラス及び瓦が物理的衝撃により割れることを考慮したもので、条例第 3 条第 1 項第 1 号で規定する「特定不燃材料で有効な仕上げをした建築物等の部分 (以下「有効な仕上げ」という。))」の構成材料とすると、破損した場合、可燃物が露出し、火災となるおそれがあるからである。

一方、飲食店等の厨房においては、調理中の煙や油が客席に入ることを防ぎ、調理状況を客に見せるために、火気設備等の周囲に間仕切りとしてガラスを設置したいという相談を受けることが多くある。

ガラス破損の物理的衝撃以外の原因として、ガラスが日射等により加熱される熱膨張の影響²⁾ が知られているが、その実験の殆どは、ガラス全面を一様に加熱するもので、ガスこんろ (以下「こんろ」という。) のような火気設備等の近傍における局所的な加熱に関する知見は非常に少ない。

このような状況を鑑み、本検証では表 1 に示すガラスを対象として、有効な仕上げではなく、火気設備等の周囲に間仕切りとして設置しても安全な条件を明らかにした。

表 1 検証対象ガラス

名称	板厚 [mm]	熱伝導率 [W/m·K]	特徴
フロートガラス	5, 8, 10, 12	1.0	一般的なガラス
強化ガラス	5, 8, 10, 12	1.0	①フロートガラスの 3~5 倍の強度 ②ガラス破損時の破片は細かい粒状 ③フロートガラスの数倍の耐熱性
耐熱強化ガラス	5, 6.5, 8, 10, 12	0.9	①強化ガラスの 2 倍以上の強度 ②ガラス破損時の破片は細かい粒状 ③防火設備及び特定防火設備に使用可
Low-E ガラス	Low-E3+A6+FL3	— (複層)	日射熱 33% カット
低膨張ガラス	6.5	1.0	①フロートガラスの 2 倍の強度 ②熱膨張係数が小 (フロートの約 1/3) ③防火設備及び特定防火設備に使用可
耐熱結晶化ガラス	5, 8	1.5	①フロートガラスと同等の強度 ②熱膨張係数がほぼ 0 ③防火設備、特定防火設備に使用可

2 設置可否の判定基準

火気設備等の離隔距離の範囲内に、これらのガラスを設置した場合に起こりうる事態を想定して、次の(1)及び(2)をガラス設置可否の判定基準 (以下「基準」という。) とした。これらのうち、1 つでも満たせないガラスは、火気設備等の周囲に設置するガラスとして不適切であると判断した。

(1) 火災危険

火気設備等の離隔距離内にガラスを設置することで、ガラスが熱流束を増強するなどして、可燃物に着火させる危険性がないか確認した。本検証では、木材に着火を引き起こす熱流束である $10\text{kW}/\text{m}^2$ 以上³⁾ が、可燃物部分 (こんろ側方 15cm) で測定されるかどうかを基準とした。

(2) 避難障害及び受傷危険

* 装備安全課 ** 芝消防署

- ア ガラス非加熱面温度 70℃以上（1 秒間以上の接触で上皮の損傷が生じる温度⁴⁾）
- イ ガラスの熱割れ又は初期消火時の急冷割れ

3 検証方法

(1) 予備実験

ア 接着剤による影響

ガラス非加熱面にT型熱電対（以下「熱電対」という。）を接着剤で貼付したときの影響を確認するため予備実験を実施した。本検証では JIS S 2103（家庭用ガス調理機器）に適合するこんろ（こんろバーナー 1 個当たりのガス消費量上限 5.8kW）を使用し、JIS S 2103 に定める試験用なべの大きさから直径 30 cmのアルマイト加工試験用なべ（以下「なべ」という。）を選定し、常時なべ高さの半分以上の水位となるよう適宜給水しながら加熱した（以下「加熱」という。）。加熱しているこんろ側方 5 cmの位置にスライドガラスを固定し、左に接着剤①（シリコン系接着剤、耐熱温度 316℃）、右に接着剤②（超高温耐熱性シーラー、耐熱温度 1,100℃）及び下に接着剤を用いず熱電対をガラス表面に接触させ、30 分間測定した（図 1）。

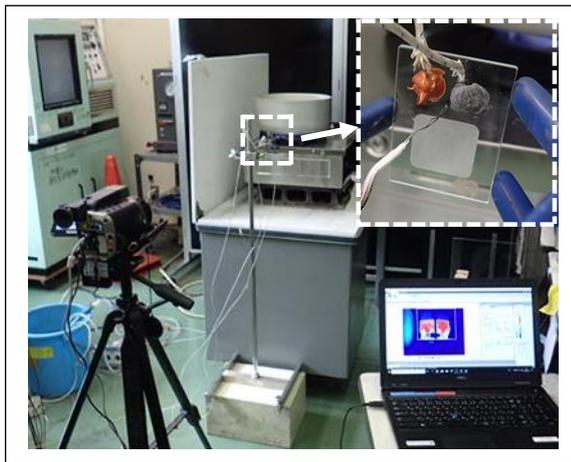


図 1 予備実験状況

イ なべのずれによる影響

調理中になべ等がずれた状態で加熱したときに、こんろからの全熱流束がどのように変化するか確認した。こんろ端を 0 mmとして、なべを 30 mm、60mm 又は 80mm 外側に移動させた状態で加熱し、表 2 の位置に全熱流束計を設置して 30 分間測定した（図 2）。

表 2 なべずらしと全熱流束計設置距離

なべずらし [mm]	全熱流束計設置距離 [mm]				
0	0	20	50	100	150
30		30	50	100	150
60		60	70	100	150
80		80	90		

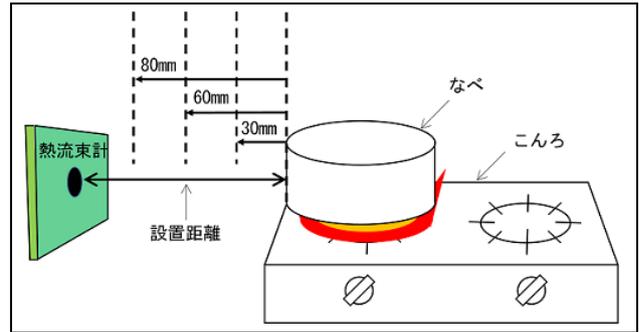
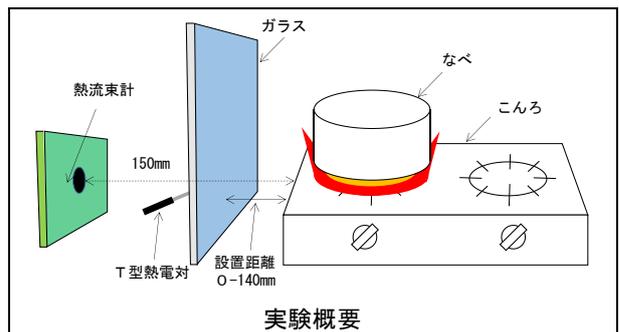


図 2 なべずらし実験イメージ

(2) ガラス温度及び全熱流束

ガラスが前 2 (1)及び前 2 (2)アの基準を満たす最小の設置距離を確認した。こんろで予熱したガラスの温度分布を赤外線熱画像カメラ（検出器：2次元非冷却センサ、測定波長：8～14μm、測定温度：-20℃～500℃、測定距離：10cm～∞）（以下「赤外線カメラ」という。）で撮影し、ガラス非加熱面の最高温度点に熱電対（3 cm間隔、正方形に 9 本配置）を接触させ、1 時間測定した。この測定に引き続き、ガラス温度が定常状態のときの全熱流束を 30 分測定した（図 3）。



実験概要



熱電対による非加熱面温度測定状況



全熱流束計による測定状況

図 3 実験概要及び実験状況

(3) 熱割れ及び急冷割れ

なべ底を舐めた火炎がガラスに接炎することを想定し、ガラスをこんろ側面及びなべに接する状態で1時間加熱して、前2(2)イの基準を満たすか実験した。Low-E ガラスはLow-E膜がこんろ側とし設置した。この間に熱割れしなかったガラスは、高温状態での初期消火を想定し、氷で十分に冷却した水 0.2Lを掛ける急冷試験を実施した。

4 検証結果

(1) 予備実験

ア 接着剤による影響

接着剤①及び②の接着 24 時間後の接着状況を示す(図 1)。接着剤①はシリコンのため、熱電対とガラス表面が弾力性を持ち接着しており、外力が加えられても容易に取れることはなかった。一方、接着剤②は硬化しているため、外力が加わると抜けてしまい、ガラス表面に保持することが難しいことが分かった。

接着剤別のガラス非加熱面の測定結果を示す(図 4)。最高温度は接着剤なし 63.1℃、接着剤①75.4℃、そして接着剤②78.1℃であった。接着剤なしと接着剤②では、最高温度に 15℃の差が生じるため、接着剤は用いないこととした。

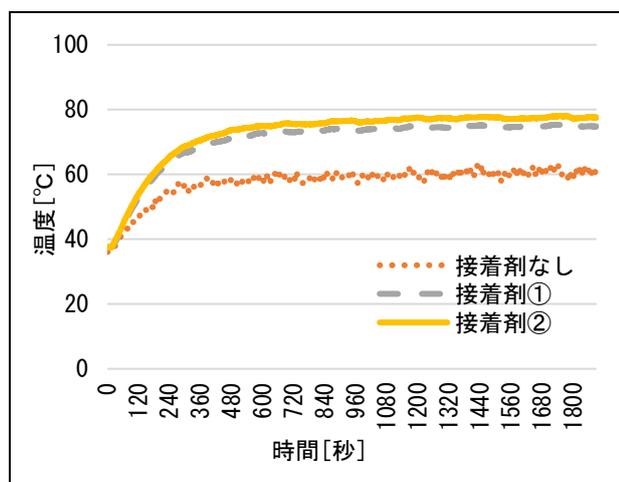


図 4 接着剤によるガラス非加熱面温度差

イ なべのずれによる影響

なべずらしなしの全熱流束計設置距離 0mm で 34.8kW/m²、なべずらし 30 mm の全熱流束計設置距離 30 mm で 19.9 kW/m²、なべずらし 60 mm の全熱流束計設置距離 60 mm で 14.3 kW/m²、そして、なべずらし 80mm の全熱流束計設置距離 80mm で 11.5 kW/m² の全熱流束が測定された(図 5)。

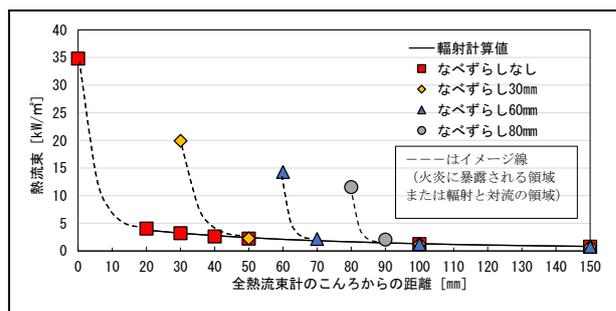


図 5 なべずらしによる全熱流束の変化

(2) ガラス温度及び全熱流束

前 2 (1)及び前 2 (2)アの基準を満たしたガラスの測定結果を示す(表 3)。これらの値は、それぞれのガラスについて 3 回測定したうちの最高値である。

強化ガラス 5 mm 及び 12 mm は設置距離 30 mm、耐熱強化ガラス 5 mm は設置距離 40mm、同 12 mm は設置距離 30 mm、耐熱結晶化ガラス 5 mm は設置距離 40mm、同 8 mm は設置距離 30mm、低膨張ガラス 6.5mm は設置距離 40mm で基準を満たした。

表 3 ガラスの最小設置距離等 (N=3)

種類	板厚 [mm]	最小設置距離 [mm]	非加熱面温度 [°C]	全熱流束 [kW/m ²]
強化ガラス	5	30	59.4	0.36
	12	30	62.2	0.32
耐熱強化ガラス	5	40	59.8	0.34
	12	30	59.8	0.33
耐熱結晶化ガラス	5	40	66.4	0.38
	8	30	66.8	0.34
低膨張ガラス	6.5	40	68.5	0.36

(3) 熱割れ及び急冷割れ

フロートガラス 5 mm は、点火後 1 分 55 秒で熱割れしたため、他の板厚については実験を実施しなかった。

強化ガラス 5 mm は熱割れしなかったが、急冷実験で冷水をかけたところ直ちに急冷割れしたため、他の板厚も対象外とした。

耐熱強化ガラス 5 mm は熱割れ及び急冷割れしなかった。同 12 mm でも熱割れしなかったが、冷水をかけた 2 分 13 秒後に急冷割れしたため、他の板厚も対象外とした。

Low-E ガラスは、加熱から 1 分 40 秒後に熱割れしたため、実験対象から除外した。

低膨張ガラス板厚 6.5mm、耐熱結晶化ガラス 5 mm 及び 8 mm は熱割れ及び急冷割れしなかったため、一度実験に供したガラスに、同内容の実験を追加で 2 回計 3 回実施したが、熱割れ及び急冷割れしなかった(図 6 及び表 4)。



図6 ガラス熱割れ及び急冷割れ

表4 熱割れ及び急冷実験結果

ガラス	板厚 [mm]	ガラス状態 ※
フロートガラス	5	▼
	8	—
	10	—
	12	—
強化ガラス	5	★
	8	—
	10	—
	12	—
耐熱強化ガラス	5	●
	6.5	—
	8	—
	10	—
	12	★
Low-E ガラス	Low-E3+A6+FL3	▼
低膨張ガラス	6.5	●
耐熱結晶化ガラス	5	●
	8	●

※ ▼熱割れ ★急冷割れ ●変化なし —実施せず

5 考察

(1) 予備実験

ア 接着剤による影響

接着剤①及び②は、茶色及び灰色で反射率が小さく、塗布により表面積が増し、高温になったと考えられる。このことから、付着した汚れが原因で、一部が高温になる可能性があるため、定期的な清掃をする必要があると考えられる。

ガラス全面を一様に加熱する研究では、セラミック系接着剤を用いてガラスと熱電対を接着しているものがあるが⁵⁾、これらの熱膨張率の差により熱割れを生じる可能性を考慮し、前述の理由と合わせ接着剤を用いず熱電対を接触させた。これにより、熱膨張率差による熱割れ及び測定温度に与える影響を最小限にできたと考えられる。

イ なべのずれによる影響

なべがずれたことにより、なべ近傍の全熱流束が上昇し、こんろが可燃物側に接近したのと同様の効果を生み、過酷な熱環境を与えることが分かった。

(2) ガラス非加熱面温度及び全熱流束

表3の非加熱面温度が測定されたときの各ガラス加熱面温度を、表面に輻射熱を受ける平板の定常熱収支の式①から求めた⁶⁾ (図7)。

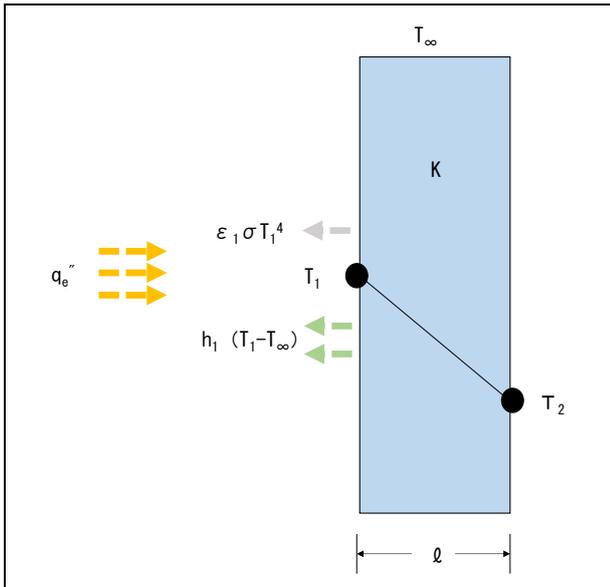


図7 表面に輻射熱を受ける平板の定常熱収支

$$q_e'' - \{ \epsilon_1 \sigma T_1^4 + h_1 (T_1 - T_\infty) \} = k / l (T_1 - T_2) \dots \textcircled{1}$$

q_e'' : 熱流束 (kW/m²) ϵ_1 : 放射率

σ : ステファン=ボルツマン定数 (5.67×10¹¹Wm⁻²K⁻⁴)

T_1 : 加熱面温度 (K) h_1 : 熱伝達率

T_∞ : 環境温度 (K) k : 熱伝導率 (kW/mK)

l : 板厚 (m) T_2 : 非加熱面温度 (K)

この式中の $\{ \epsilon_1 \sigma T_1^4 + h_1 (T_1 - T_\infty) \}$ は、加熱面から発せられ、 q_e'' の値を小さくするものである。そこで、危険側に立ち当該部分に0を代入し、加熱面温度 T_1 についての式として簡略化すると式②となる。

$$T_1 = T_2 + q_e'' l / k \dots \textcircled{2}$$

式②から加熱面温度 T_1 を求めたものを表5に示す。加熱面温度 T_1 (°C) は、強化ガラス 5 mm 75.4°C、同 12 mm 104.9°C、耐熱強化ガラス 5 mm 74.2°C、同 12 mm 102.5°C、耐熱結晶化ガラス 5 mm 75.5°C、同 8 mm 94.1°C、低膨張ガラス 6.5mm83.3°Cで、最高でも 100°C程度となることが分かった。強化処理を施したガラスは、高温下で使用すると表面の圧縮応力が緩和（以下「応力緩和」という。）し、強度が低下することが知られている。表面温度 250°C の状態で、70 時間加熱した場合の強化ガラスの応力緩和は、120MPa から 110MPa 程度に低下するのみであることから、ガラス加熱面が 100°C程度となるような設置距離では、応力緩和が小さく、繰り返し加熱の影響は小さいと考えられる⁷⁾。

表5 ガラス加熱面温度

種類	T_2 [°C]	設置距離 30 mm の q_e''	設置距離 40 mm の q_e''	l	k	T_1 [°C]
強化ガラス	59.4	3.2	-	5	1.0	75.4
	62.2	3.2	-	12		104.9
耐熱強化ガラス	59.8	-	2.6	5	0.9	74.2
	59.8	3.2	-	12		102.5
耐熱結晶化ガラス	66.8	-	2.6	5	1.5	75.5
	68.5	3.2	-	8		94.1
低膨張ガラス	66.4	-	2.6	6.5	1.0	83.3

(3) 熱割れ及び急冷割れ

フロートガラス 5 mm及び Low-E ガラスの破損状況を見ると、加熱部分が熱膨張し、低温の周辺部に拘束され熱割れしていることが分かる。特に、フロートガラスの熱割れ直後の状況は、図8²⁾に示したガラスの熱膨張がサッシに抑え込まれ熱割れする状況を局部的に再現していると言える（図9）。

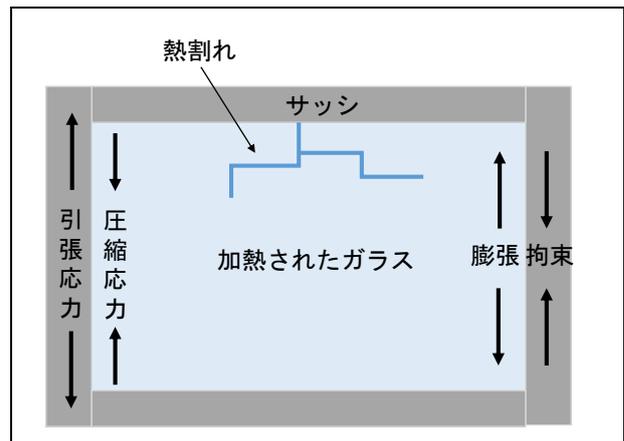


図8 ガラス加熱による熱割れ発生機構

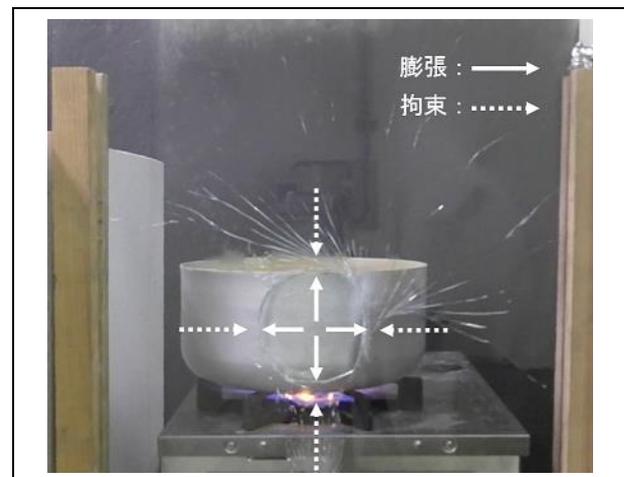


図9 局所的な熱割れ機構

強化ガラスは表面に強化処理がなされ、表面の圧縮応力層とガラス内部の引張応力層がバランスを取り、その形状を保持している²⁾ (図 10)。



図 10 強化ガラス断面と応力層

強化ガラス 5 mm では急冷直後にこのバランスが崩れ、全面が細かい粒状に飛散した。急冷された瞬間のガラス表面の状態は、耐熱強化ガラス 12 mm の急冷直後の状態から推察することができる。耐熱強化ガラスも表面に超強化処理がされているため、ガラス表面の圧縮応力層(約 250MPa) と内部の応力のバランス変化で急冷から約 2 分後に破損し、粒状に飛散した。その時の急冷直後のガラスを見ると、こんろの火が接炎している部分に細かな亀裂が生じていることが分かる (図 11)。

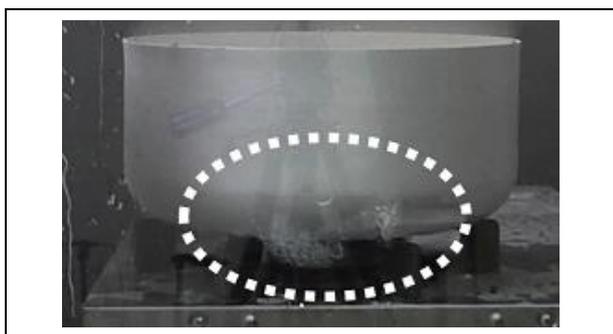


図 11 耐熱強化ガラス急冷直後の表面亀裂

このことから、強化ガラスでも急冷直後の一瞬にガラス表面に小さな亀裂が生じ、表面と内部の応力のバランスが崩れ破損に至ったと考えられる。

今回得られた局所的な加熱による熱割れ及び急冷割れの結果に加え、ガラス全面を一様に加熱する過去の研究でも、耐熱強化ガラス 5 mm や 8 mm が急冷により割れることが報告されている。一方、低膨張ガラス 6.5mm 及び耐熱結晶化ガラス 5 mm は破損しなかった結果が示されている⁸⁾⁻¹⁰⁾。

これらの結果から総合的に判断して、こんろ上のなべ等の調理器具がずれ、火炎が接炎するような不適切な状態で調理をした場合を想定すると、フロートガラス、強化ガラス、耐熱強化ガラス及び Low-E ガラスは熱割れ又は急冷割れをすることが否定できないことから、安全性を考慮し、基準に適合しないものとして取り扱うこと

が望ましいと考えられる。

低膨張ガラスも耐熱強化ガラスと同様に表面に約 150MPa の圧縮応力層を強化処理により持たせているが急冷に耐えることができたのは、耐熱強化ガラスの膨張係数 $88 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ($\sim 380^{\circ}\text{C}$) に対し、低膨張ガラスの膨張係数 $33 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ($\sim 380^{\circ}\text{C}$) と半分以下であったため、加熱による熱膨張量が少なく、急冷した際にもガラスの許容応力を超えるような変化が発生しなかったと考えられる。

耐熱結晶化ガラスは、膨張係数 $-6 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ($\sim 380^{\circ}\text{C}$) と更に小さいため、加熱及び急冷による影響は、低膨張ガラスよりも小さいであろうことが分かる。本検証では、低膨張ガラス 6.5mm 及び耐熱結晶化ガラス 5 mm が設置距離 40mm、耐熱結晶化ガラス 8 mm が設置距離 30mm で基準を満たし、かつ、繰り返しの加熱による影響が小さいことを確認できた。しかし、実際の調理を考慮すれば、前(1)イで見られるように、なべずれによる影響が大きく出るものと考えられる。一般財団法人日本ガス機器検査協会のガス機器防火性能評定試験基準¹¹⁾を準用すると、今回使用したこんろでは 80mm のなべずれが想定されることになる。なべずれ 80mm での全熱流束計設置距離 90mm では $2 \text{ kW}/\text{m}^2$ の全熱流束が測定され、なべずれなしの状態における全熱流束計設置位置 30mm 及び 40mm での全熱流束は、それぞれ $3.2 \text{ kW}/\text{m}^2$ と $2.6 \text{ kW}/\text{m}^2$ であった。

このことから、ガラスの設置距離を 90mm 以上とすれば、基準を満たす設置距離 30mm 及び 40mm での全熱流束未満となるため、なべずれに影響されずに安全に使用できると考えられる。

また、本検証で用いたこんろ以外の火気設備等を用いる場合も、安全率を考慮し、ガラス加熱面での全熱流束 $2.4 \text{ kW}/\text{m}^2$ (設置距離 50 mm での全熱流束) 以下となるよう設置距離を確保すれば、ガラスを安全に設置できると考えられる。

6 おわりに

- (1) ガラスは、低膨張ガラス 6.5 mm 若しくは耐熱結晶化ガラス 5 mm 又は 8 mm を使用する。
- (2) ガス消費量 5.8 kW 以下のガスこんろの周囲に設置するガラスは、なべずれを考慮して、設置距離 90 mm 以上とする。
- (3) その他の火気設備等の周囲に設置する場合は、ガラス加熱面での全熱流束が $2.4 \text{ kW}/\text{m}^2$ 以下となるように設置距離を確保する。

7 謝辞

本検証の実施にあたり、板硝子協会の佐藤明憲氏、鈴木一幸氏、大本英雄氏、一般財団法人日本ガス機器検査協会の森下浩二氏、浦添恵氏、圓福貴光氏、横浜国立大学大学院教授の大谷英雄先生より多くの貴重な知見を賜りました。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 東京都条例第 65 号、昭和 37 年 3 月 31 日（最終改正令和元年 9 月 26 日条例第 58 号）
- 2) AGC 板ガラス建材総合カタログ技術資料編
- 3) 岡勉ら、木材の密度と着火時間の関係、日本建築学会構造系論文集第 559 号、pp. 233-236、2002 年 9 月
- 4) Moritz, A. R. et al: Studies of Thermal Injury, Am. Jour. Pathol. Vol. 23, p. 711 (1945-47)
- 5) 鈴木一幸ら、耐熱強化ガラスと網入板ガラスの比較実験、平成 25 年度日本火災学会研究発表会概要集 (2013. 6)、pp. 252-253
- 6) 田中哮義、改訂版建築火災安全工学入門、日本建築センター、平成 14 年、pp. 293-298
- 7) 増田優子ら、強化ガラスの加熱による応力緩和とその破壊特性
- 8) 関信生ら、防耐火ガラスを用いた消防活動拠点等のあり方に関する調査研究その 1、平成 21 年度日本火災学会研究発表会概要集 (2009. 5)、pp. 294-295
- 9) 久田隆司ら、防耐火ガラスを用いた消防活動拠点等のあり方に関する調査研究その 2、平成 21 年度日本火災学会研究発表会概要集 (2009. 5)、pp. 296-297
- 10) 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
- 11) ガス機器防火性能評定試験基準
FPS-1(Fire prevention standard-1)JIA J 001-15、一般財団法人日本ガス機器検査協会