

## 熱強化法によるガラスの強化

GMS 研究所, 帝京大学 理工学部 非常勤講師

荒谷 真一

### Strengthening of glass by tempering method.

Shin'ichi Aratani

GMS Research Laboratory, Lecturer, Teikyo University

#### 1. はじめに

熱強化ガラスは、一般の板ガラスと比べて2～3倍の強度増加があり、破壊時に断片化現象を示すことから、安全ガラスとして広く用いられている。熱強化ガラスにおけるクラック伝播現象に関しては前稿で述べた<sup>1)</sup>。本稿ではガラス強化法の概要について述べる。

#### 2. 熱強化メカニズム

熱強化ガラスは、その名の通り熱を利用しており、徐冷ガラスを軟化点近傍の温度まで加熱した後、表面から急冷することにより製作される(図1)。このとき、境界膜(Laminar film)がガラス表面近傍に発生し、冷却能に大きな影響を与える。この急冷とガラスの粘性流動により、表層には圧縮の、中央部には引張の残留応

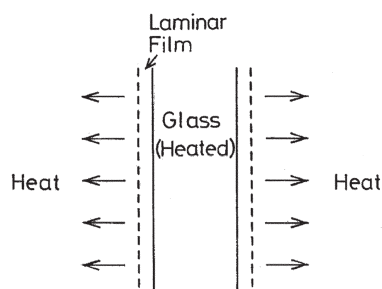


図1 熱強化時の熱伝達

力が大きく配された熱強化ガラスができる(図2)。

熱強化メカニズムの詳細な理論解析は簡単ではない。そのため、ある一定の転移温度 $\tau$ で粘(粘弾)性体から弾性体へ瞬時に変化するという瞬間凍結理論(Instant freezing theory)の考え方で解析されている例が多い。Akeyoshiら<sup>2)</sup>はFourierの熱伝導方程式を解くことにより引張応力 $\sigma$ は $\sigma \approx qL/8\lambda$ で近似できることを、高津ら<sup>3)</sup>は断片密度が強化時のガラス温度とBiot数の関数となることを報告している。

〒362-0022 埼玉県上尾市瓦葺 1964-10  
 TEL 048-723-0379  
 FAX 048-723-0379  
 E-mail: wildv4nn1@yahoo.co.jp

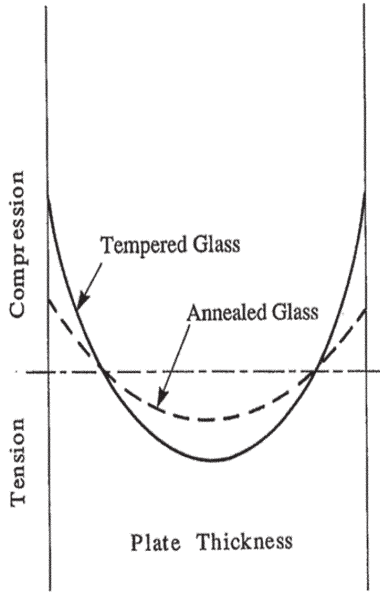


図2 熱強化ガラスの応力分布

ここで、 $q$ は熱流束、 $L$ は試料板厚の $1/2$ 、 $\lambda$ は熱伝導率である。この瞬間凍結理論を用いた知見は極めて有用であり、例えばガラス板厚が薄くなると、急冷時の熱伝達係数は板厚に応じて大きくする必要のあることを明確に示してくれる。

しかし、Gardonら<sup>4)</sup>は転移域を通過するとき、既にガラス内部に応力が発生することを見出し、転移温度 $\tau$ での発生応力がゼロとする瞬間凍結理論での限界を示した。また、Leeら<sup>5)</sup>はrelaxation modulus functionを導入することにより良い近似を示した。著者ら<sup>6)</sup>は粘性特性の時間的な因子を陽にした解析により、主に熱膨張率 $\alpha$ 、熱伝導率 $\lambda$ 及び粘性特性( $\partial\eta/\partial T$ )の3因子から引張応力 $\sigma$ を推定することができ、一般の板ガラス組成において易強化性に寄与するのは $CaO$ 、 $Na_2O$ 、 $K_2O$ 、 $MgO$ 、 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ の順序であることを示した。

熱強化メカニズムの概念は、例えばパーティ会場に集まったペアの集まりの行動として、簡易的に考えることもできる(図3)。○は若い男性(一時応力:圧縮)、●は若い女性(一時応力:引張)、□は年配の男性(永久応力:圧

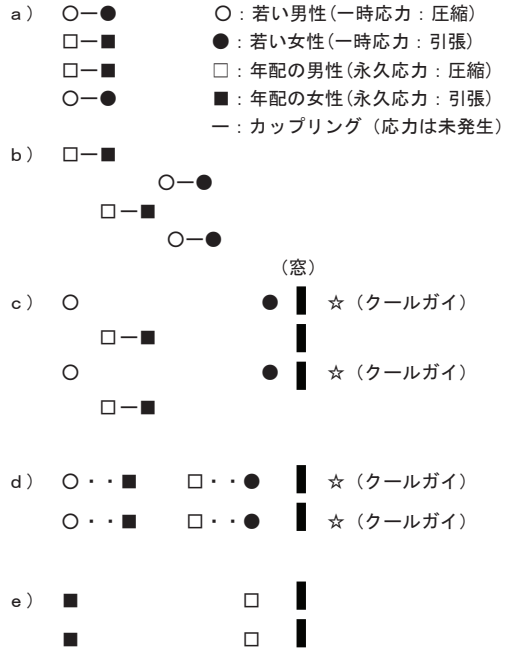


図3 熱強化メカニズムの簡易的な考え方

縮)、■は年配の女性(永久応力:引張)、☆はクールガイ(急冷)、-はカップリング(応力が発生しない状態)を意味している。

- a) パーティ会場に若いペアと年配のペアが集まってきた。この段階では、それぞれのペアが一緒に行動しており、まだ大人しい→ガラス内での熱膨張現象も応力の発生も認められない。
- b) お酒も入り、各人の行動範囲が広がる傾向にあるが、まだペア単位で行動している→若干の熱膨張現象は認められるが、応力の発生はなし。
- c) クールガイがパーティ会場の外側に突然登場した。そのクールガイを見るために若い女性が窓のそばに一斉に殺到した。若い男性は、パーティ会場の中央に置きざりにされ、荒れている者もいる→急冷が開始され、ガラス表層には一時的な引張応力が発生。
- d) 若い男性には年配の女性が、若い女性には年配の男性が近づくことにより、疑似的な

カップルができ、パーティ会場は落ち着きつつある→粘性流動と応力緩和によるガラスの安定化。

- e) クールガイがいなくなり、いつの間にか若いペアもパーティ会場から立ち去った。しかし、年配の男女それぞれは移動後の位置から動けなくなり、その位置に留まったままである→表層には圧縮応力、内層には引張応力が残留応力として残り、熱強化ガラスを得ることができた。

### 3. 熱強化方法

熱強化方法としては、風冷法、浸漬法、固体接触法、水ミスト法等が提案されているが、ガラスを加熱することは共通しており、その冷却媒体が異なっている。

風冷法は空気を冷却媒体とする強化法で、大半の熱強化ガラスはこの方法で作られている。空気は冷却中の熱伝達係数がガラス温度に依存せずほぼ一定なので、生産管理をしやすいからである。しかし、空気で大きな熱伝達係数を得ることは難しいとされ、薄板熱強化ガラスの開発には別の冷却媒体が必要とされていた。このため、液体中に浸漬する浸漬法<sup>7)</sup>(図4)、液体を浸み込ませたガラスクロスと接触させる固体接触法<sup>8)</sup>(図5)、空気に水ミストを加える水ミスト法<sup>9)</sup>(図6)等が提案された。熱強化ガラスの薄板化は進み、3mm厚未満の熱強化ガラ

スも開発されているが、現在でも風冷法により製造されている。これは、冷却用空気の供給装置やノズルの改良により、従来知られていた熱伝達係数の限界を超える開発がなされたからである。著者ら<sup>10)</sup>も衝撃波が発生する条件ではその熱伝達係数が大幅に増加することを見出し、風冷法の改良で薄板強化ガラスの製造に寄与できることを報告している。

浸漬法による熱強化ガラスとしては、トリプレックス社から Ten-Twenty という名称の液冷強化ガラスとして商品化されたことがある

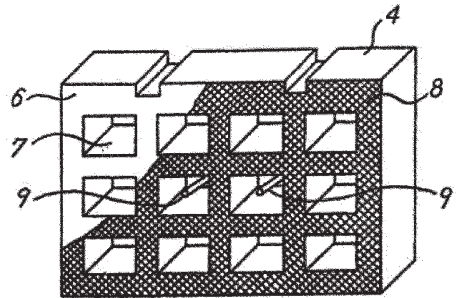


図5 固体接触法の概要 (4: 固体接触用部材, 6: 接触する領域, 7: 非接触の領域, 8: ガラスクロス, 9: スプレー用ノズル)

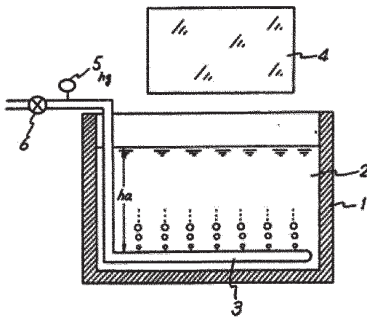


図4 浸漬法の概要 (1: 浸漬槽, 2: 冷却用液体, 3: パブリング用パイプ, 4: 板ガラス, 5: 圧力計, 6: パブリング調整用バルブ)

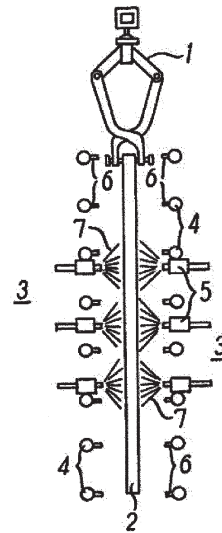


図6 水ミスト法の概要 (1: 板ガラス吊具, 2: 板ガラス, 3: 急冷装置, 4: 空気噴出用パイプ, 5: 水ミスト発生ノズル, 6: 水ミスト噴出口, 7: 水ミスト)

が、現在は販売されていない。浸漬法は種々の冷却媒体を選択できるので、大きな熱伝達係数を得ることができる。しかし、液体を冷却媒体とした熱伝達は自然対流熱伝達から核沸騰熱伝達、遷移領域を経て膜沸騰熱伝達と急冷時の温度変化に伴って著しく熱伝達係数が変化する。このため、急冷時の熱伝達係数の管理が極めて難しい。固体接触法や水ミスト法も実験室的には薄板強化の有力な手法として使われてはいるが、安定的な管理は難しく、実生産にはほとんど使われていない。

#### 4. まとめ

ガラスの熱強化法について、簡単に述べた。これらをまとめると、以下ようになる。

- 1) 瞬間凍結理論により多くの知見が得られてきたが、限界もある。粘性特性の時間的な因子を陽にした解析により、一般の板ガラス組成において易強化性に寄与するのは  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の

順序であることを示したのもその一例である。

- 2) 熱強化法は種々提案されているが、従来知られていた熱伝達係数の限界を超える開発がなされた結果、3 mm 厚未満の熱強化ガラスも風冷法により製造されている。

#### 参考文献

- 1) 荒谷眞一, NEW GLASS, 15 [2] 35 (2000).
- 2) K. Akeyoshi et al., Rept. Res. Lab., Asahi Glass Co., Ltd., 17 (1967), 23.
- 3) 高津 学, 池田周嗣, 窯業協会誌, 84 (1976), 19-23.
- 4) R. Gardon, O. S. Narayanaswamy, J. Am. Ceram. Soc., 48 (1970), 380.
- 5) E. H. Lee, J. G. Rogers, T. C. Woo, J. Am. Ceram. Soc., 48 (1965), 480.
- 6) 荒谷眞一, 村本 正, 西 瑞樹, 日本材料強度学会誌, 45 (1012), 61.
- 7) 例えば, 日本国特許第 1490505 号.
- 8) 例えば, 日本国特許第 1495409 号.
- 9) 例えば, 日本国特許第 1495402 号.
- 10) 荒谷眞一, 博士学位論文, 東北大学 (1996).