

# 風冷強化した肉厚ガラスの研削に対する安全性

東芝材料研 ○岸井 貫，高塩 治男

## 1. はしがき

風冷強化された板ガラス中の応力分布はよく研究されている。厚さ方向に、応力は放物線的な形で分布しており、厳密に言えば、急冷中の粘弾性の効果などにより、いくらか変化する。このように強化したガラスは、研削などのように、傷を多くつける加工ができないと考えられてきた。また、このような強化は、膨張係数が大きいガラスでないとは有効でないといわれている。

我々は、硬質ガラスで作られた肉厚ガラス製品の風冷強化をした場合、応力分布が放物線形からかなりはずれること、表面の圧縮応力層を研削し続けても破壊しないこと、硬質ガラスでもある程度の、場合によっては軟質ガラスと同じ位の強さの圧縮応力を表面に作れることを見つけた。これに対して、次のような考察と実験をした。

$h$  cal/cm<sup>2</sup>·°C·s 0.0053 0.0053 0.0053 0.0106

## 2. 風冷中の応力発生過程

固化温度より高い温度で、一様な温度分布で保持されたガラス板が、その面に冷風を吹きつけられると、板の内部に温度の不均一が発生し、また全体として温度が低下してゆく。ガラスは表面から内部へと、温度不均一があるままで固化する。最後に、ガラス全体の温度が均一になると、各部に収縮量の不平等が発生するはずであるが、各部相互が制約しあい、収縮を助けまたは妨げるので、弾性応力が発生する。

冷風の風量、風速に対応して、つぎのようないくつかの場合が考えられる。

a. 冷却効果が弱い場合 板の厚さ方向の温度分布は放物線的であり、時間が経過しても、この形は変わらず、全体が一様な速度で冷却してゆく。それゆえ、常温で温度が一様になった時に発生する応力も、放物線的な分布をする。たとえば H.N. Ritland, J. Amer. Cer. Soc., 40 [5] 153 (1957) 参照。

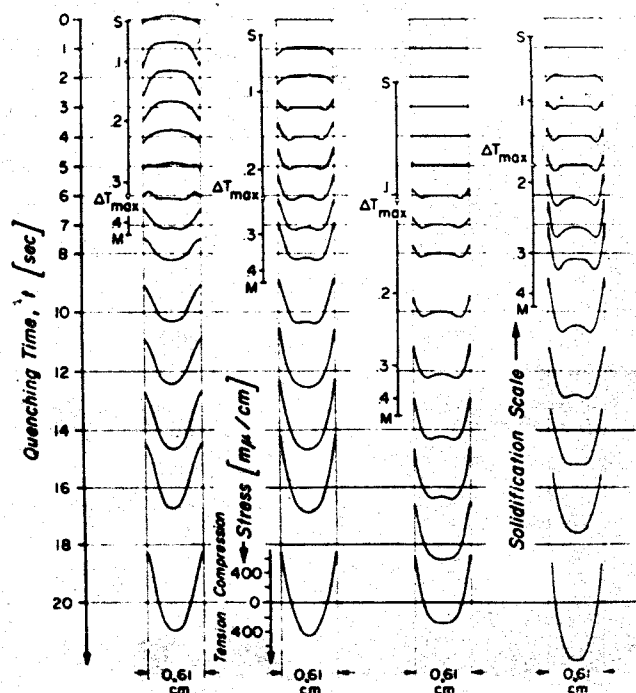
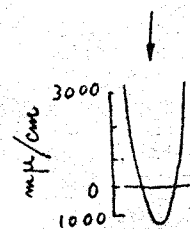


Fig. 7. Stress distributions through the thickness of plate glass during quenching.

冷却後



第1図 Gardonの測定結果  
J. Am. Cer. Soc., 52 [10] 554 (1969)

b. 冷却効果が極端に強い場合 板の表面は瞬時に冷風の温度になり固化する。固化の前線は始めは急速に、ついでゆっくりと内部へ進行する。固化部分は、温度分布の時間的变化にともない、応力を発生する。

上記の二つの場合の区別は、近似的には次の関係によると言えよう。

$$\left\{ \text{表面の熱伝達係数 } h \times 100^{\circ}\text{C} \right\} \gg \left\{ \text{ガラスの熱伝導率} \times \left( \frac{300^{\circ}\text{C}}{500^{\circ}\text{C}} \right) \div \text{厚さ} \right\}$$

$\uparrow$  表面と風との温度差       $\uparrow$   $\sim 0.0017 \text{ cal/cm}^2 \cdot (\frac{\text{C}}{\text{cm}}) \cdot \text{s}$        $\uparrow$  ガラス内の温度差

第1図は R. Gardon 等による実験結果および計算結果である。応力の分布は冷却中、冷却後ともほぼ放物線的である。熱伝達係数  $h$ 、厚さなどがわかっているので、上の関係式に入れてみると、右辺が大きく、a. の場合に近かったと言える。風冷を激しくする ( $h$  を大きくする) こと、厚さを大きくすることは、b. の場合へ近づける。

### 3. 風冷中のガラスの温度分布

#### a. 半無限固体の假定を使う場合

a.1 表面が急激に冷やされた時 温度  $T_0$  に保たれた半無限固体の表面が、瞬時に  $T_s$  に変えられた時の、内部の温度は、時間を  $t$ 、深さを  $x$ 、 $a$  を温度伝導率 (熱伝導率  $\div$  比熱  $\times$  密度) として

$$\frac{T - T_s}{T_0 - T_s} = \text{erfi} \left( x / (2\sqrt{at}) \right), \quad \text{erfi}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\beta^2} d\beta \equiv \Phi(z)$$

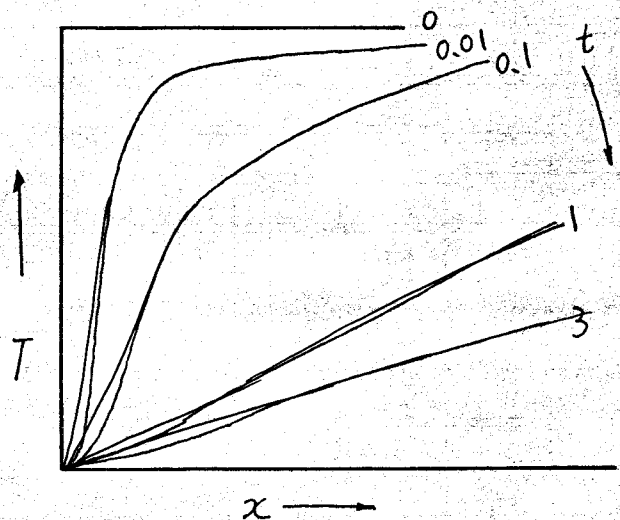
である。第2図は温度分布の時間的变化の計算例である。

a.2 表面からの熱放散により冷える場合 媒質の温度を零とする。温度分布は

$$\frac{T}{T_0} = \Phi \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) + e^{Hx + H^2 at} x$$

$$\left\{ 1 - \Phi \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} + H\sqrt{at} \right) \right\},$$

ただし  $1/H = \text{熱伝導率 } \lambda / h$



第2図  
表面を冷却された半無限固体内の  
(瞬時に) 温度分布

b. 有限厚さの無限板面の假定を使う場合。

b.1 表面が急激に冷却された時 厚さを  $l$  として

$$\frac{T - T_s}{T_0 - T_s} = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ e^{-\frac{n^2 \pi^2 a^2 t}{l^2}} \frac{l}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \sin \frac{n\pi x}{l} \right]$$



b.2 表面からの熱放散により冷える場合 媒質温度を零とする。

$$\frac{T}{T_0} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-a \alpha_n^2 t} \frac{\alpha_n \cos \alpha_n x + H \sin \alpha_n x}{(\alpha_n^2 + H^2)l + 2H} \int_0^l (\alpha_n \cos \alpha_n x + H \sin \alpha_n x) dx$$

$$\alpha_n \text{ は } \tan \alpha l = \frac{2\alpha H}{\alpha^2 - H^2} \text{ の解である。}$$

以上のように、温度分布の計算は、原理的には容易である。

#### 4. 応力の計算法

計算法にはいくつかあるが、比較的簡単で、直観的に見通しやすいのは、Bartenev のものである。R.Gardon, 第7回国際会議 論文 No.79 参照。

ガラスの固化温度を  $T_g$  とし、次の式を満足する関数  $\Psi(x)$  を決める。

$$\frac{d\Psi}{dx} = \left[ \frac{dT}{dx} \right]_{T=T_g}$$

すなわち、 $\Psi$  の勾配は、固化した瞬間における温度勾配に等しい。応力  $\sigma$  は

$$\sigma(x) = \frac{AE}{1-\nu} (\Psi(x) - \Psi_{av}), \quad A: \text{膨張係数}, E: \text{ヤング率}, \nu: \text{ポアソン比}$$

$\Psi_{av}$  は  $\Psi(x)$  の平均値

我々が取り扱う場合は、放物線的溫度分布での冷却の場合に比べ、表面近くでの  $[dT/dx]_{T=T_g}$  が非常に大きい (3.a.1, 3.b.1 などの場合は表面では無限大になる) ことが特徴である。それゆえ、放物線的分布の場合に比べ、応力分布は、内部では一様に近く、冷却面で急上昇する傾向がある。このことを第3図に説明的に図示した。

固化時の溫度分布の形が急速に変る場合に、Bartenev の計算法が適用できるかどうか疑問があるが、別の機会に検討する。

#### 5. 実験

三種類のガラスで  
30 X 30 X 7 mm の大  
きさの板を作った。

実験1

ガラス板を炉内で

第1表  
ガラスの種類と性質

	膨張係数 $\alpha_{100-300} (10^{-7}/^{\circ}\text{C})$	転移点 $T_g (^{\circ}\text{C})$	屈伏点 $T_c (^{\circ}\text{C})$	軟化点 $T_s (^{\circ}\text{C})$
鉛ガラス (PbO 30 wt%)	94	440	530	610
高アルミナガラス	60	640	750	840
テレックス	37	500	650	770

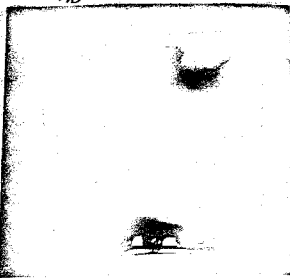
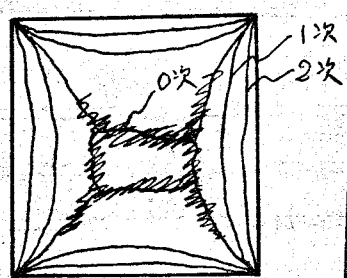
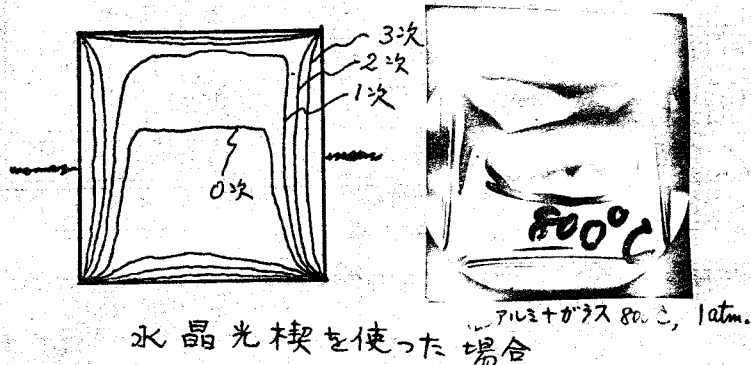
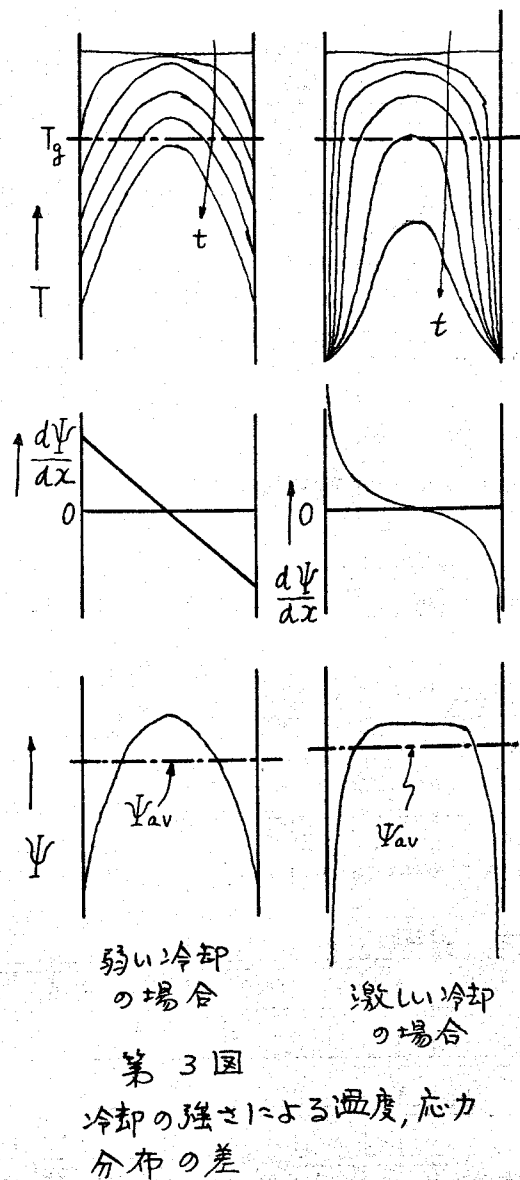
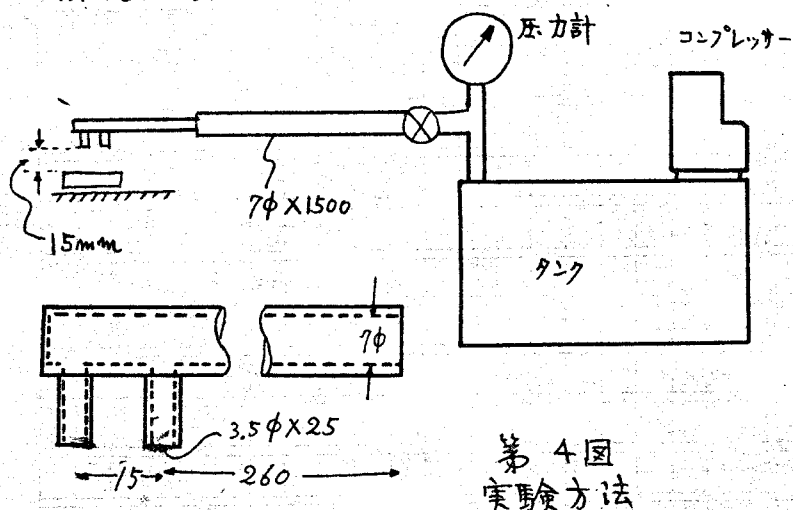
$$94 \times 10^{-7} \times 440 = 41$$

$$\begin{array}{r} 440 \\ 94 \\ \hline 3760 \\ 376 \\ \hline 4136 \end{array}$$

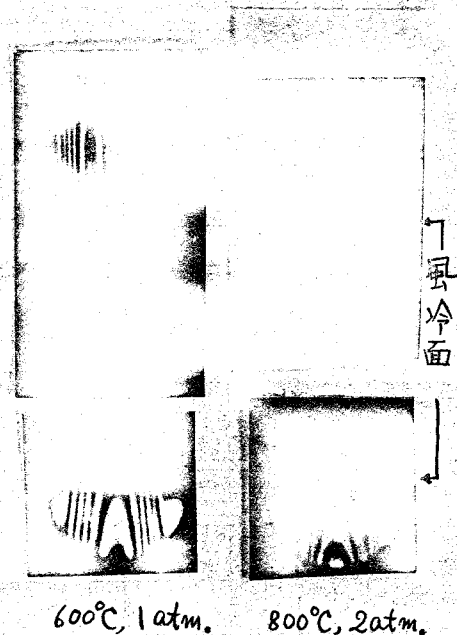
$$\begin{array}{r} 60 \\ 640 \\ \hline 3840 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 37 \\ 500 \\ \hline 18500 \end{array}$$

一定温度に加熱し、炉外へ引出してすぐ空気を吹付けた。方法を第4図に示す。ノズルに対向したガラス面にはしるしをつけた。吹付けの方向と平行に、直交ニコル下で、水晶光楔を加え、あるいは加えないで観察し、応力の大小を定性的に知ろうとした。第5図は、観察の状況を例示している。応力の目安として、周辺に現われる光弾性縞の次数を読みとった。結果を第2～4表に示した。比較的膨張係数が小さい高アルミナガラスでも、鉛ガラスに劣らないくらいに応力が発生している。テレックスガラスでは膨張係数が小さいため、やや応力が小さい。テレックスでは、板の厚さ方向の応力分布を見ることがある程度可能であった(第6図)。



第5図 観察状況の説明と例



第6図

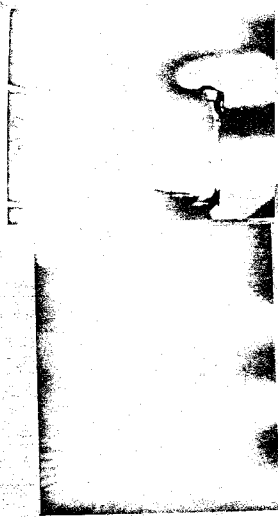
## 実験 2

このような観察をした後、板を割り、ノズルに対向していた部分の破片をとり、厚さ方向の応力分布を観察した。破片の厚さは均一でないから、定性的な観察である。風冷面の縞の次数を厚さ1cm当りに換算して第5~7表に示した。第7図は水晶光楔を使っての観察例で、風冷された面に強い応力が、しかも面に向い急増する分布で入っている。



鉛ガラス  
575°C, 1 atm.

←風冷面



高アルミナガラス  
790°C, 1 atm.

← 風冷面

フレックス  
800°C, 0.5 atm.

← 風冷面

第7図 破片断面の応力分布の観察例

第2表 鉛ガラス板の応力の程度  
(端部での次数)

風冷開始溫度(℃)

	600	585	575	565	550	540	520	510	485
冷却風の強さ(全圧)	0 (放冷)	1.5		1.7		0.8		1.8	
	0.5				2.2			2.0	
	1	3.1	2.8		2.7		1.8	2.2	1.5
	2				3.1			2.4	

第3表 高アルミナガラス板の  
応力の程度

		風冷開始溫度 (°C)					
		830	800	790	750	710	700
冷却風 の強さ (atm)	0 (放冷)		2.5		2.2		1.2
	0.5			2.8	2.3		
	1	4.5	3.8	3.7	2.5	1.5	
	1.5				2.8		
	2			4.2			

第4表 テレックスガラス板の  
応力の程度

		風冷開始溫度(°C)							
		850	800	750	700	650	600	550	500
冷却風の強さ (atm)	0			1.1			0.3	0.3	0.1
	0.5		1.2		1.1		0.4		
	1	2.2	2.2	2.3	1.5	1.2	0.5	0.3	
	1.5			2.3	1.5		0.5		
	2	2.2	2.4	2.1		1.1			

第5表 鉛ガラスの風冷面の応力の強さ  
(しもの次数/cm)

風冷開始溫度(°C)

	600	585	575	565	550	540	520	510	485
氣	0	0.8		0.9		1.1		0.6	
壓	0.5							3.0	
atm	1	4.7		4.7		3.0		3.6	1.8
	2			4.4		3.8	2.8	2.5	

第6表 高アルミナガラスの風冷面  
の応力の強さ  
(回数/cm)

		温度℃					
		830	800	790	750	710	700
気圧	0		1.1		0.6		0.4
	0.5			4.0	0.9		
	1	4.3	3.6	3.0	2.0	1.1	
	1.5				1.1		
2				4.7			

第7表 テレックスガラスの風冷面  
の応力の強さ  
(回数/cm)  
温度(℃)

		850	800	750	700	650	600	550
気圧	0			0.5	0.3			
	0.5		2.3		1.2		0.5	
	1	1.5	1.5	2.7	2.0	0.5	0.7	0.4
	1.5			2.7	2.0		0.5	
2		3.8	1.8	3.2		0.4		

実験 3 ガラス板の対向する二側面を急冷し、ここに圧縮力を入れた。圧縮力層を少しづつカーボランダムで摺り落して行った。板は破壊せず、また圧縮力層が除かれると、内部に新しい圧縮力層が発生するという経過を繰り返した。第8図は高アルミナガラスで、水晶光楔を使って観察した場合、第9図はテレックスガラスで、直交ニコルだけで観察した場合である。

## 6. 結論

a. ガラスの肉が厚いと、急冷された場合の内部の温度分布、応力分布は、従来知られていた放物線的なものと異なる。応力は表面近くになると急増するが、内部での引張り応力は比較的低い。

b. 発生する応力は、ガラスの膨張係数に比例する。しかし、冷却中の温度勾配の分布にも関連するので、低膨張ガラスでも相当の程度に強化することができよう。

c. 高アルミナガラス(膨張係数  $60 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ )は鉛ガラスと同程度に強化することができた。

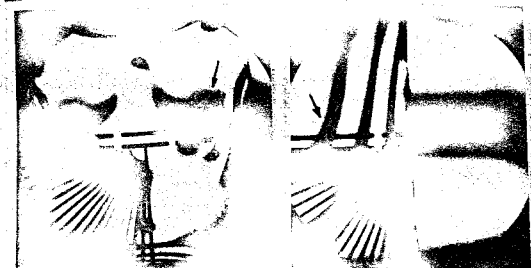
d. 強化が十分できるためには、冷却開始温度は高い程良い。実用上は、ガラスの軟化によって上限が決まるだろう。屈伏点以下では強化の効果は小さい。

e. 冷却風は風速、風量とも大きい方がよい。

f. 肉厚ガラスでは、表面の圧縮力が強い一方、内部の張力が弱いので、加傷、衝撃などに対して安全である。圧縮層を研削加工することさえできる。研削除去しても、新しく圧縮力層が発生する。



研削前

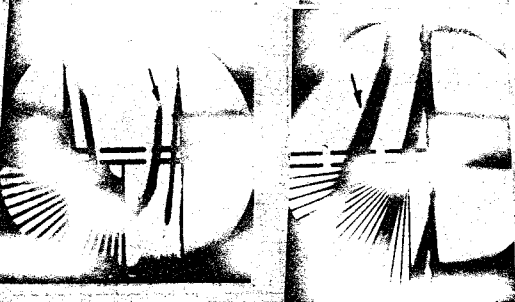


2mm

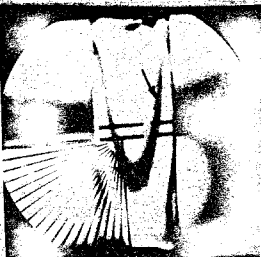
研削



5mm



8mm



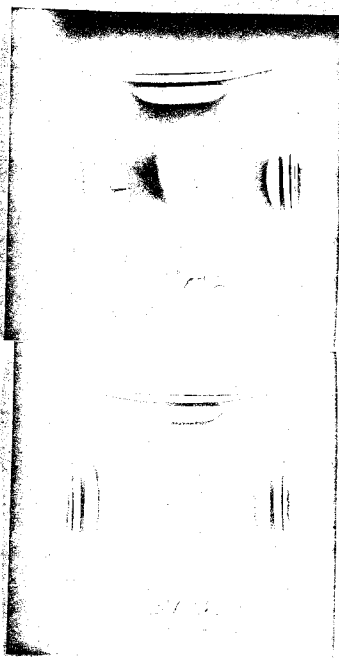
10mm



12mm

矢印は0次の筋を示す。

第8図 高アルミナガラスの  
圧縮力層の研削除去  
にともなう応力変化  
(分布の)

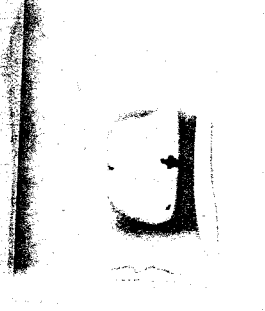


研削前



1mm

研削



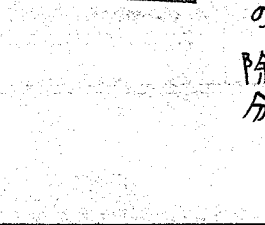
3mm



5mm



7mm



10mm

第9図 テレックス  
の圧縮力層の研削  
除去にともなう応力  
分布の変化