

実験・技術・調査報告・Report

風冷強化ガラス中の非放物線的応力分布 に関する技術的知見

岸 井 貫*・高 塩 治 男**

(*東京芝浦電気(株)材料研究所, **東京芝浦電気(株)堀川町工場)

Some Observation on Non-Parabolic Stress Distribution in Quench-Hardened Plate Glasses

By

Toru KISHI* and Haruo TAKASHIO**

(*Materials Laboratory and **Glass Division, Tokyo Shibaura Electric Co., Kawasaki,
Japan.)

Stress distribution in severely quenched thick plate glasses was examined. Three kinds of glasses (thermal expansion coefficient: $37\sim 94\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$) were quenched by air blast from softening ranges of temperature. Photoelastic observations indicated that: 1) Stress distribution in the direction of thickness was not parabolic; stresses and stress gradients were extremely high near the blasted surfaces, 2) Stress distribution was not simple; in some blasting conditions tension at surface layers and saw-teeth-shaped stress distribution were found; 3) The glass with relatively low thermal expansion ($60\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$) could be stressed as effectively as a soft lead glass; glass transition temperature multiplied by expansion coefficient seemed to be a measure of possible stressing.

Thus we have found non-parabolic stress distribution which had been forecast theoretically but not found experimentally. The results indicate that stress distribution depends on both the degree of air quenching and the deformation of glass plate during blasting.

[Received May 13, 1971]

1. 緒 言

現在、工業的に得られる強化ガラスのほとんどは、風冷強化法による。軟化温度域に保たれたガラス板の両面に冷風を吹きつけると、表面から内部へ、冷却、固化の過程が進行し、温度の不均一があるまま全体が固化する。最後にガラス全体が常温になると、内部での自由収縮量が不均一であり、各部分が相互に収縮を制約するので、弾性応力が発生する。特に表面層には、表面に平行な圧縮応力が現われ、外部的な原因による張力の発生と、それによる破壊を妨げるので、ガラス板は見かけ上破壊しにくくなり、実質的に強化される。

このようにして強化されたガラス体の内部での、厚さ方向の応力分布について、いくつかの実測と理論計算とがある。

Rithand¹⁾は、固化の開始から終了までに温度分布の形が変わらない(絶対値は時間とともに低下する)ような場合の一般論を導き、冷却後の応力分布は放物線形であ

ること、両面での冷却の激しさに差があってもこのことは成立し、放物線の主軸が冷却のゆるい面に向かい単に平行移動するだけであることなどを結論した。

Aggarwala および Saibel²⁾は、ガラスがマクスウェル型の流動(歪の緩和速度が、応力と応力の緩和速度との一次式で表わされる)をすとして応力分布を計算し、冷却がゆるいときは放物線形になることを認めた。なお、冷却が速い時は放物線の頭が平たくなったような形に変わることを予測した。

Lee, Rogers および Woo³⁾は、ガラスの歪緩和特性に、粘弾性実験から得られた関数を代入し、冷却後の応力分布を電算機で求めた。結果はいずれも放物線形に近かった。Woo⁴⁾はさらに計算を精密にし、また段階的および非対称的な冷却操作が応力分布におよぼす効果を調べた。しかしこれらは、放物線形をいくらか修正する程度であった。

Gardon⁵⁾も同様な前提で計算を進め、同様な結果を得、

実験結果と比較した。それによれば、工業的に実用されている激しさの冷却（ガラス体の表面での熱伝達係数 h が約 $0.005 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ ）の2倍の激しさで風冷した場合でも、応力分布が放物線形に近いことが確かめられた。

Vanin⁶⁾ は、引上げられる板ガラスの幅方向の応力分布が、放物線形でなく

$$Y = Y_0 \left(1 - \frac{5X^4}{A^4} \right)$$

Y : 応力, Y_0 : 常数 (応力の次元をもつ)

A : 板の幅の半分, X : 板の中心線からの距離
の形をしていると報告している。ただし、これは厚さ方向の応力分布とは事情が違うことは明らかである。

Bartenev⁷⁾ は、厚さ方向の応力分布が

$$K \left(\log_e \cos \frac{\delta_1 x}{a} - C \right)$$

K, C : 常数, a : 板の厚さの半分,

x : 板の厚さの中心面からの距離,

δ_1 : 冷却の激しさを表わす量; 冷却が激しいほど大きく、 $\pi/2$ に近づく。

で表わされるとした。この式は、 $\delta_1 \rightarrow \pi/2$ になると表面近くに強い応力集中ができることを示しているが、彼自身は実験結果を、 $\delta_1 \ll \pi/2$ の場合の近似式である放物線形として取扱っている。

非放物線形の応力分布がありうることは、常識的に明らかであり、理論的にも予測されていたにもかかわらず、実験的に見出されなかった理由はいくつも考えられる。すなわち、

1. 放物線形分布は、冷却が非対称であっても実現するという意味で、一般性がある
2. 現在までの実験は、固化中の温度分布の形が不変という仮定を乱すほどには、冷却が急激でない
3. 現在までの実験は、ガラス板が無限平面である（たわみやずり応力が発生しない）という仮定を近似的に満たす条件で行なわれた
4. 現在までの実験は、板ガラス工業での必要から行なわれており、ガラスの厚みがそれほど大きくなかったため、冷却を急激にしても、放物線的分布からはずれなかった

などである。

固化中の温度分布が不変だという現象は、表面から雰囲気への熱伝達の速さが、内部での熱伝達の速さより小さい時におきる。定性的に式で書けば

$$h \times (\Delta T)_{\text{表面}} \leq \Gamma \times (\Delta T)_{\text{ガラス}} \div a$$

h : 表面の熱伝達係数

$(\Delta T)_{\text{表面}}$: ガラス表面と雰囲気との温度差

Γ : ガラスの熱伝導率, $0.0017 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot(\text{C}/\text{cm})^{-1}$

$(\Delta T)_{\text{ガラス}}$: ガラス体内の温度差, たとえば
 $300^\circ \sim 500^\circ \text{C}$

a : 板の厚さの半分

前記の Gardon の実験では、 $h=0.01 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}\cdot\text{sec}^{-1}$, $a=0.3 \text{ cm}$ なので、 $(\Delta T)_{\text{表面}}$ が $150^\circ \sim 300^\circ \text{C}$ 以下ならば、放物線の分布の条件が成立していたと考えられる。

放物線形の応力分布では、その原因となる固化中のガラス体内の温度傾度は、ガラス体中での伝導と輻射による熱伝達の大きさで定まる。しかし、ガラス体の温度は軟化温度以上になしえないから、伝導および輻射による伝熱の速さにも上限があり、したがって温度傾度、さらには応力の大きさにも上限があると考えざるを得ない。しかし、非放物線形の応力分布が実現することが確かめられれば、表面付近だけに大きい温度勾配を与え、強化の程度をさらに上げる可能性が確かめられたことにもなる。

非放物線の応力分布を実現し、確認するために、つぎのように条件を選んで実験した。すなわち、板を厚くすること、冷却を極端に非対称にすることである。

2. 実験方法と結果

2.1 実験方法

図-1 のように、コンプレッサ、タンク、ノズルを使った。急冷の度合は、吹出し前に圧力計が示した気圧で

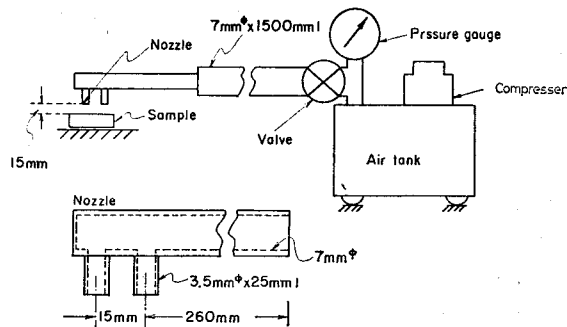


Fig. 1. Cooling method of glass plate by air-blasting.

表わした。使ったガラスの種類と性質を表-1 に掲げた。ガラス体断面の応力分布は、バビネ補正器を用いた光弾性式歪計で観察した。

厚さ 0.5 mm 、長さ 25 cm の鋼片の一端にガラス試料を乗せて、横型管状電気炉に入れて加熱した。15分間加熱してから、試料をノズルの下へ引出し、空気バルブを開いて風を試料の上面へ吹きつけた。

ガラス体の厚さ方向の応力分布を見る場合、試料をそのまま観察することは、光弾性効果が大きすぎてできなかった。そこで、冷却後に破壊し、ノズルの吹出口に対向していた部分の破片をとって観察した。破片の形は規

Table 1. Properties of glasses used for this experiment.

Glass	Thermal expansion coefficient $\alpha(10^{-7}/^{\circ}\text{C})$ (100°~300°C)	Transformation point $T_g(^{\circ}\text{C})$	Deformation point $T_d(^{\circ}\text{C})$	Softening point $T_s(^{\circ}\text{C})$	$\alpha \cdot T_g(10^{-3})$	Photoelastic constant ($\text{m}\mu/\text{cm}$)/(kg/cm^2)
Lead glass (PbO 30 wt%)	94	440	530	610	4.1	2.9
Non-alkali glass ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ alkali earth oxide)	60	640	750	840	3.8	2.7
Borosilicate glass (Terex®)	37	500	650	770	1.9	3.4

則正しくないし、その奥行きも一定にはならない。また、破壊することによって、ある程度の応力緩和も当然起きるはずであるから、測定にはバラつきが多く、観察結果は半定性的なものである。Bartenev⁹⁾も同じ理由で、完全な実験はできなかったと述べている。著者らの場合は破片の奥行きは 2~5 mm の範囲にあり、破壊後にある時間がたってから再破壊する現象を経験したことはなかった。

2.2 冷却条件と表面の応力

30×30×7 mm の大きさの板の、30×30 mm の一面を急冷した。冷却後に破壊し、ノズルの吹出口に対向していた部分の破片を採った。厚み方向の応力分布を観察した。代表的な観察例を図-2 に示し、半定性的なスケッチを図-3 に配列した。スケッチの原図となった写真は、すでに配列して発表した⁹⁾ので、繰返しては示さない。冷却された面に生じた圧縮応力と、冷却条件(冷却前のガラスの温度、空気タンクの圧力)との関係を表-2 に示す。

Table 2. Effects of quenching conditions on stress (kg/mm^2) at glass surface.

(a) Lead glass							
Pressure of cooling air (atm)	Temperature of glass before quenching ($^{\circ}\text{C}$)						
	485	510	540	550	565	575	585 600
0		1	2		2		1
0.5		6					
1		4	7		6	10	10
2		5	6	8		9	

(b) Non-alkali glass						
Pressure of cooling air (atm)	Temperature of glass before quenching ($^{\circ}\text{C}$)					
	700	710	750	790	800	830
0		1		1		2
0.5				2	9	
1			2	4	7	8 10
1.5				2		
2					11	

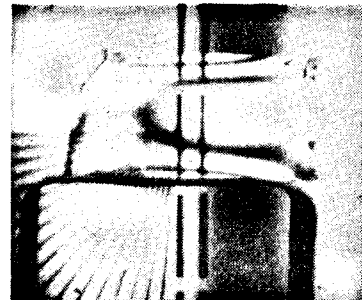
(c) Borosilicate glass							
Pressure of cooling air (atm)	Temperature of glass before quenching ($^{\circ}\text{C}$)						
	550	600	650	700	750	800	850
0				0.5	1		
0.5		0.7		2		4	
1		0.6	1	0.7	3	4	2 2
1.5			0.7		3	4	
2				0.6	5	3	6



(a) Lead glass
Temperature of glass before quenching; 575°C, Pressure of cooling air; 1 atm.

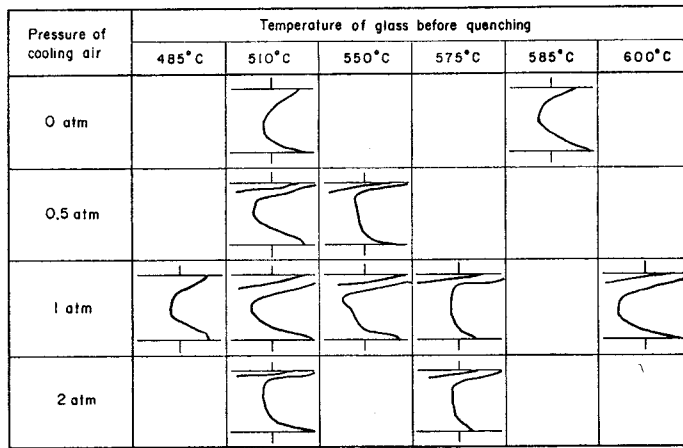


(b) Non-alkali glass
Temperature of glass before quenching; 790°C, Pressure of cooling air; 1 atm.

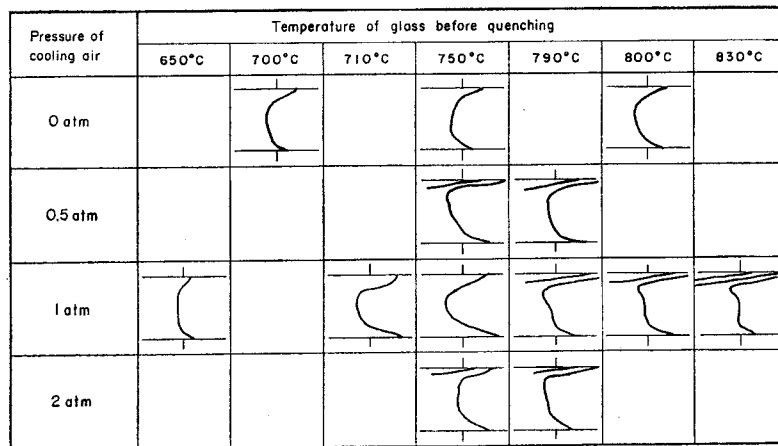


(c) Borosilicate glass
Temperature of glass before quenching; 750°C, Pressure of cooling air; 1 atm.

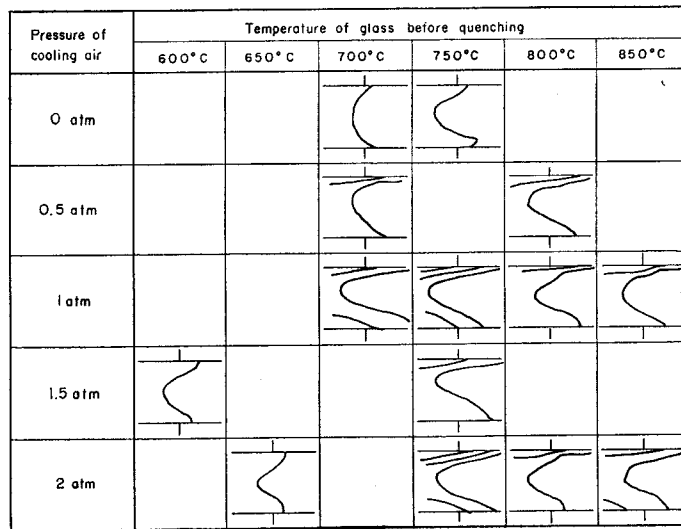
Fig. 2. Examples of severe stress and stress gradient near blasted surfaces (upper surfaces in the figure).



(a)

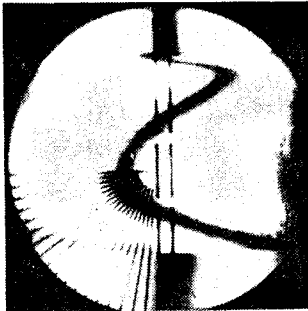


(b)

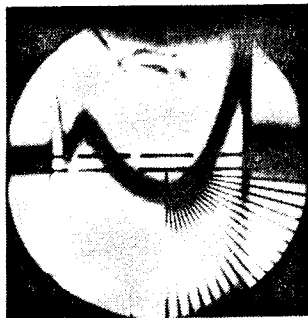


(c)

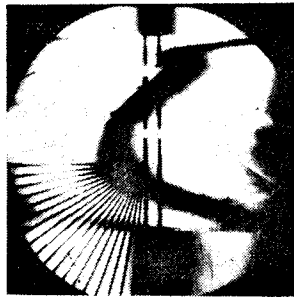
Fig. 3. Sketches of stress distribution along the thickness of quenched glasses.
 Upper surfaces were blasted while lower surfaces were not thermally insulated.
 Deviations of black fringes to right and left referring to neutral lines indicate compression and tension, respectively.



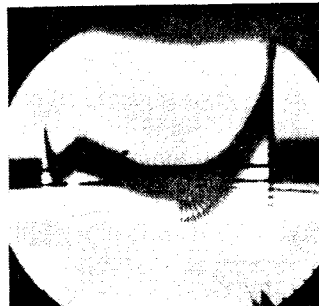
(a) Non-alkali glass
Temperature of glass before quenching;
900°C, Pressure of cooling air; 0.25 atm.



(b) Non-alkali glass
Temperature of glass before quenching;
850°C, Pressure of cooling air; 0.125 atm.



(c) Non-alkali glass
Temperature of glass before quenching;
800°C, Pressure of cooling air; 0.125 atm.



(d) Borosilicate glass
Temperature of glass before quenching;
750°C, Pressure of cooling air; 0.5 atm.

Fig. 4. Examples of peculiar stress distributions in quenched glasses. Upper surfaces were blasted while lower surfaces were not thermally insulated. Deviations of black fringes to right and left referring to neutral lines indicate compression and tension, respectively.

2.3 複雑な応力分布を示す例

13×13×7 mm の大きさのガラス板を、13×13 mm の一面を除いて石綿でおおい、これらの面から外部への急激な熱放散を防ぎ、おおわれない面を急冷すると、ある範囲の冷却条件下では、特に複雑な応力分布が現われる。代表的な観察例を図-4 に示す。このような写真をトレースして得た図形を図-5 に配列した。

3. 考 察

3.1 ガラスの性質、冷却条件と応力

表-2 によれば、いくらかのバラつきはあるが、冷却

Pressure of cooling air	Temperature of glass before quenching				
	750°C	800°C	850°C	900°C	950°C
0.12 atm					
0.25 atm					
0.5 atm					
1 atm					
2 atm					

(a)

Pressure of cooling air	Temperature of glass before quenching					
	600°C	650°C	700°C	750°C	800°C	850°C
0 atm						
0.25 atm						
0.5 atm						
1 atm						
2 atm						

(b)

Fig. 5. Complex stress distribution near blasted surfaces.

Upper surfaces were blasted while lower surfaces were thermally insulated. Deviations of black fringes to right and left referring to neutral lines indicate compression and tension, respectively.

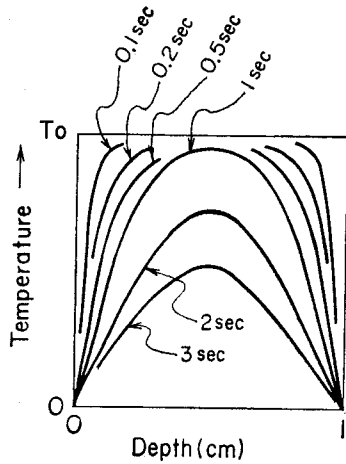
前のガラス体の温度が高いほど、また空気圧が高いほど応力が大きい。同時に、温度が高くなると応力の大きさが飽和する傾向がある。

このような実験条件で得られた応力の最高値は、鉛ガラス、無アルカリガラス、ソーダ硼珪酸ガラスの場合に、それぞれ 10, 11, 6 kg/mm² で、表-1 の ($\alpha \times T_0$) の値の大小と、だいたい対応している。これらの事実は、Bartenev⁷⁾ が、8 mm 厚の板を両面から急冷したときの、板厚の中心での応力値について観察した。

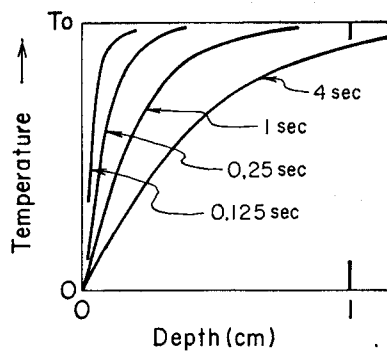
3.2 非放物線的応力分布

緒言で述べたように、放物線的分布は、固化中の温度分布の形が一定である場合に実現される。冷却が激しくなる (h が大になる) と、冷却中の温度分布はなだらかでもなく、形が一定でもなくなるので、冷却後の応力分布も放物線形からはずれる。

たとえば、厚さ 1 cm、温度 T_0 のガラスの両面が瞬時に 0°C へ冷却された場合、内部の温度分布は図-6 a)



(a) Plate glass 1 cm thick quenched from both surface.



(b) Semi-infinite solid glass quenched at surface.

Fig. 6. Temperature distributions in glasses with quenched surfaces.

Initial temperature; T_0 .
Final temperature; Zero.
Thermal conductivity of glass; 0.003 cm²/sec.

のように変化する。また半無限固体の形のガラスの一面が、瞬時に 0°C へ冷却された場合は図-6 b) のようである。いずれも、冷却の初期に表面付近での温度勾配が大きい。このように固化したガラス体内に、冷却後には表面に集中した強い圧縮力が生ずることは容易に想像されるし、図-3 の結果はこのように説明できる。この圧縮力は、放物線的な温度分布から予期されるものより大きいであろうし、したがってガラスを強化する効果は意外に顕著であろう。一方、内部の張力の値は予期されるよりも小さく、強化ガラス製品の張力による自然破壊の危険が小さくなるであろう。

3.3 特に複雑な応力分布を示す場合

図-5 の結果を図式化すると図-7 のようになる。このような分布が発生する条件は、試料が小形で、冷却前の温度が高いことである。この現象は、冷却の初期にすでに固化してしまった表面層が、層内に発生した応力のため、たわむと同時に、その内側へ固化が進行してゆくことで説明される (図-8)。

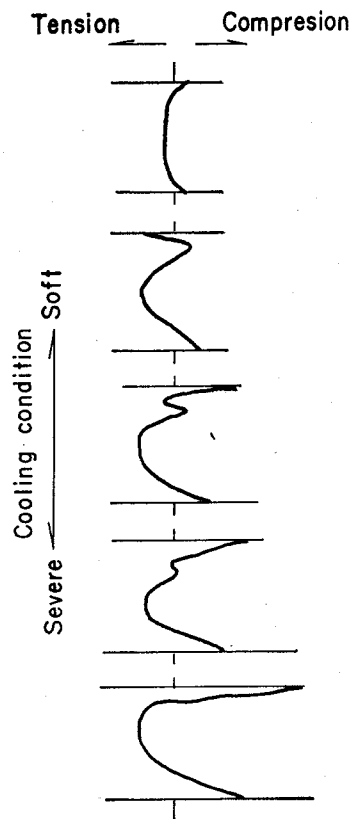


Fig. 7. Schematic explanation of change in stress distribution by cooling condition.

Upper surfaces were blasted while lower surfaces were thermally insulated. Deviations of black fringes to right and left referring to neutral lines indicate compression and tension, respectively.

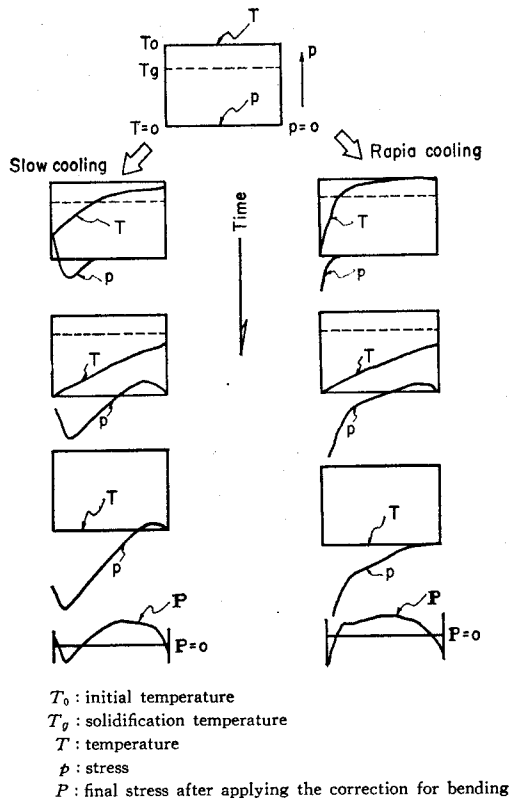


Fig. 8. Schematic explanation of the forming process of complex stress distribution.

風冷された面は、初めに大きく温度が低下するが、それ以後は内部の温度低下の方が大きい。そのため、固化した層は内部に凹になるように変形し、風冷された面に張力が発生する。同時に、固化も内部へ進行するので、これに原因する圧縮力も風冷面に重なる。全体が室温になるまでには、ガラス体全体でのモーメントが零になるように、風冷面を凸にするたわみと、それによる応力がさらに重なる。

固化した層のたわみ変形は、ガラス体が広いと、拘束されておきにくい。また冷却が激しいと、固化層が内部の粘性抵抗に打ち勝ってたわむ時間的余裕がなくなり、たわみが起きにくい。

このような複雑な応力分布が、試料内の温度分布に起因する可能性については、著者らはつぎのように考える。試料は石綿で多くの面をおおわれていたとはいえ、石綿は急激な熱放散を妨げるだけで、熱を発生し、あるいは

その熱で温度を上げるなどの働きはない。もしも露出していたガラス面の温度が、時間とともに単調に下るならば、ガラス内の温度の時間的低下も、ガラスの深さ方向の温度分布も、非単調になることは考えられない。それゆえ、著者らは複雑な応力分布の原因として、冷却中の弾性変形を考えた。変形を実測できればこの考えはもっと確かになるが、実験技術的に可能とは思えないし、したがって、現在得られる理論的な知識を合理的に組合わせて、現象を解釈するべきであろうし、他の説明方法があることを否定するものではない。

4. 結 論

現在までに研究されたガラス板の風冷強化は、冷却中の温度分布の形が定常に近く、冷却後の応力分布は放物線形に近い。しかし、ガラス板が厚くなり、あるいは冷却が激しくなると、応力の分布は放物線形からはずれ、冷却面に集中した形になる。またその結果として、冷却面に発する圧縮応力は、放物線形の分布を仮定しての予想よりかなり大きく、したがって強化の効果は予期以上に顕著であろう。

通常理論的に取扱われているのと違う条件、たとえば固化してしまった部分がたわみ変形をしつつ、同時に固化が内部へ進行する状態で強化処理をすると、複雑な形の応力分布が実現する。

文 献

- 1) N.N. Ritland, *J. Am. Ceram. Soc.* **45** [5] 153 (1957).
- 2) B.D. Aggarwala, E. Saibel, *Phys. Chem. Glasses* **2** [5] 137 (1961).
- 3) E.H. Lee, T.G. Rogers, T.C. Woo, *J. Am. Ceram. Soc.* **48** [9] 480 (1965).
- 4) T.C. Woo, *J. Appl. Phys.* **39** [4] 2082 (1968).
- 5) R. Gardon, *Comptes Rendus Congrès Intern. Verre*, Paper No. II-2 (1965); O.S. Narayanaswamy, R. Gardon, *J. Am. Ceram. Soc.* **52** [10] 554 (1969).
- 6) V.I. Vanin, *Glass and Ceramics*, **18** [12] 605 (1961).
- 7) G.M. Bartenev, *Steklo i Keram.* **6** [5] 7 (1949); *ibid.*, **7** [4] 7 (1950).
- 8) G.M. Bartenev, A.I. Kolbasnikova, *Glass and Ceramics* **14** [3] 75 (1957).
- 9) 岸井 貫, 高塩治男, 窯業協会ガラス部会講演会予稿集 (1970). (5/13/1971 受付)