

## 平面ブラウン管の徐冷技術

旭硝子(株)中央研究所

若月 博

### Annealing Technology of Panel Glass for Flat CRT

Hiroshi Wakatsuki

Asahi Glass Co., LTD. Research Center

#### 1. はじめに

CRT (Cathode-Ray-Tube) は、1897年に K. F. Braun によって発明されて以来ブラウン管と呼ばれ、極めてコストパフォーマンスに優れたディスプレイとして発展を続けてきた。しかしながら 29 インチ以上の大型で完全な平面の画像を表示できるまでには、約 1 世紀を要した。図 1 にブラウン管におけるガラスの構成を示す。ブラウン管は内部が真空のため大気圧による外力を受け、パネルと呼ばれる前面ガラスは 29 インチ程度の管種では 4~5 トンもの力を常に付加されている。画面を平面に近づける努力は継続的に行われてきたが、実用的な平面ブラウン管の商品化は困難であった。我々は平面ブラウン管用のガラスとして、物理強化パネル“TLIPRED”を開発し、平面ブラウン管に求められる機能を満足させ実用化した。本稿では、“TLIPRED”に求められた機能とその成形におけるポイントの技術を、応力制御・徐冷（アニール）技術を中心に述べる。

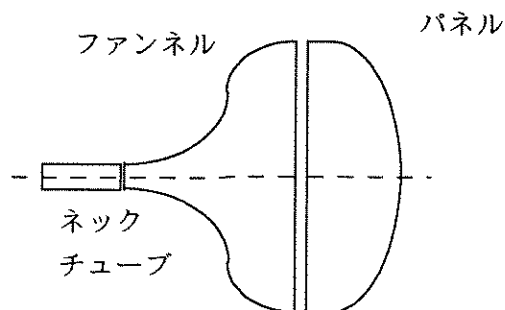


図 1 ブラウン管用ガラスの構成

#### 2. ブラウン管用パネルの物理強化

ブラウン管用パネルの製造工程の例を図 2 に示す。

パネルは、高温の溶融ガラスを金型でプレスすることで形作られ、さらに断続的に冷却される成型域を経て徐冷するプロセスによって製造される。パネルは箱形の 3 次元形状<sup>1),2)</sup>をしているため、均一に冷却する事が困難である。パネルに部分的な冷却速度のずれが生じると、表面に部分的な引張り応力が発生する。また側壁の内側にピンと呼ばれる金属を溶着する工程があるが、溶着後のガラスとピンの熱膨張率の温度依存性が厳密に一致した材料選定は困難なため、ピン溶着部周辺のガラス近傍には冷却過程

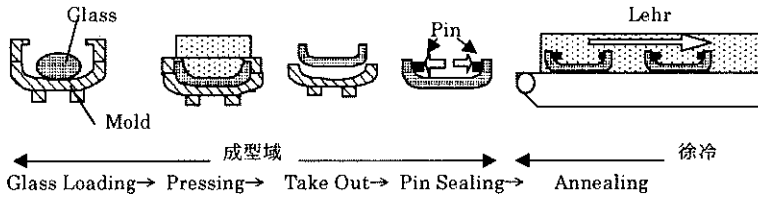


図2 ブラウン管用パネルの製造工程

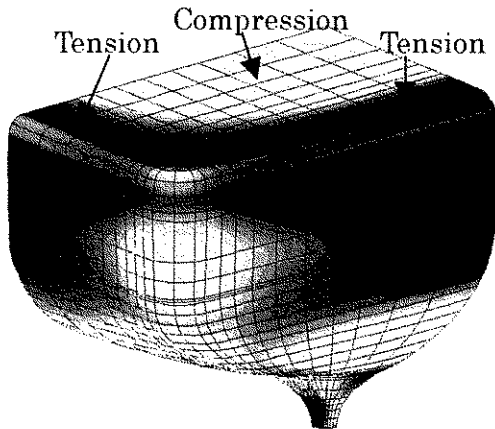


図3 平面ブラウン管の真空応力分布解析例

で引張り応力が発生する。これらのガラスに残留する引張り応力は、長期的な信頼性の低下やわずかな衝撃や傷に対して破壊しやすくなる原因となるため、ブラウン管用ガラスにおいては残留することが許されない。通常の球面ブラウン管用パネル製造工程における徐冷は、これらの引張り応力を完全に除去する目的で用いられている。

平面ブラウン管において、ブラウン管内を真空にした際にガラス表面に発生する応力（真空変形応力）を図3に示す。図3は、ブラウン管の1/4モデルである。図3より、パネル周縁部に応力集中による強い引張り応力が発生することがわかる。パネルを平面化すると、この引張り応力が従来の球面パネルに比べて約50%~70%程度強く発生する。つまりガラス強度が同じでは従来のブラウン管に比べ破壊しやすくなる。そこで強度を保つために、通常は

ガラスを厚肉にすることで発生応力を低下させる手法がとられるが、肉厚が2倍以上になってしまう。これはブラウン管全体の重量の増加を招き実用性に欠ける。そこでガラス強度を物理強化によって向上させる手法を開発した。

しかし物理強化技術をブラウン管に応用することは、従来の応力を完全に除去するというブラウン管に対する応力及び徐冷の考え方と異なる。また以下に示すようなブラウン管の機能や性能を満たす必要がある<sup>3)</sup>。

- (1) 真空容器としての高い安全性、信頼性を確保するため、真空変形応力に耐え得る静的な強度の向上、応力分布の形成が必要である。
- (2) 強化応力が高いほど、万一割れた際により細片化し易くなるために、ブラウン管組み立て工程汚染等の2次的被害をもたらす。また割れた際に、ブラウン管の内外圧力差を解消しようとして急激な空気の流入を招きやすく、その際に多数のクラックが生じることで内外圧力差に抗してバルブ形状を保持できずに爆縮に至る危険性が増える。この爆縮を防ぐ必要がある。

これらの点を勘案し、実用的な残留応力分布をパネルガラス内に形成する新しい強化プロセスを開発した。パネルガラスに物理強化を適用した新商品を、当社では総称して、“TLIPRED”と呼んでいる。“TLIPRED”製造技術は、予め過剰に強化応力を形成、調整する冷却過程と共に、冷却後にその過剰な分の強化応力を解放する緩和過程からなる。

### 3. “TLIPRED” の応力制御・緩和技術

“TLIPRED 技術”における、ブラウン管としての機能を満足するガラスの残留応力を制御するポイントは、次の3点である。

- (1) 徐冷前のパネル残留応力の制御
- (2) ガラスの温度と応力緩和の関係から推定する徐冷条件設定
- (3) 徐冷炉内でのパネル温度制御

これらのポイントについて個別に述べる。(1)については原理的な考察を、(2)、(3)は工業的に製品化する上で、簡易で実用上十分な検討手法について述べる。

#### 3.1 徐冷前のパネル残留応力

成型域におけるパネルの内・外表面の温度履歴を、伝熱シミュレーションした結果を図4に示す。図4において熔融状態（約1000℃）のガラスを落下させた時刻を0として、約600s以降で徐冷炉に入る。ガラスがプレスされて徐冷炉に入る迄の時間は、徐冷工程が500℃程度から常温近くまで時間が約2時間程度かけて徐冷させることに比べてかなり短く、しかも1000℃から400℃程度までガラスの温度が下がっているわけで、徐冷工程に比べてかなり急冷されていると見てよい。これは成型域でガラスが応力を付与される可能性があることを示唆している。図4より、プレスされた後、冷却とリヒートを繰り返しながら温度が低下し、内・外表面で温度差が生じていることが

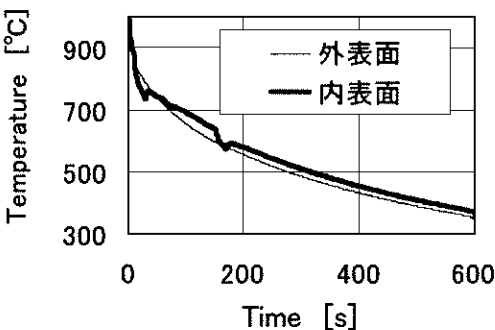


図4 成型域でのパネル温度履歴

わかる。図4のような温度履歴を通過した後、一定の徐冷を行ったガラスの応力を、粘弾性数値解析で推定した結果を図5に示す。

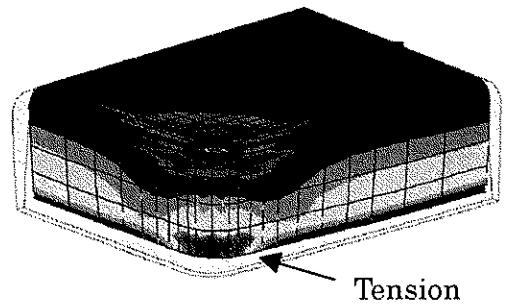
計算には汎用ソフトMARCのNarayanawamy<sup>5),6)</sup>モデルを用いた。

このときに使用したガラス物性値を表1に示す。また緩和の応答関数(1)式を使用するが、

$$M(\xi) = \sum W_i \exp\left[-\frac{\xi}{\tau_i}\right] \quad (\sum W_i = 1) \quad (1)$$

計算に使用した項数*i*=3における緩和時間 $\tau$ と重み*W*を、実験的に決定した値を表2に示す。

図5より、パネル表面に部分的な引張り応力が発生する部位が存在することがわかる。この現象を、ガラスの断面模式図を示した図6を用いて考察する。一般的にガラスを高温から冷却すると、肉厚方向の温度分布によって表面が圧縮、断面が引張りになる肉厚方向応力分布



パネル外面側応力分布

図5 パネル粘弾性解析結果例

表1 粘弾性解析に用いたガラス物性

Mass Density	2780	[kg/m <sup>3</sup> ]
Specific Heat	963	[J/(kg·K)]
Thermal Conductivity	2.33	[W/m·K]
Young's Modulus	73.7	[GPa]
Poisson's Ratio	0.23	[-]
Thermal Exp.	9.8E-06	[1/K]
Activation Energy	628	[kJ/mol]
Gas Constant.	8.31	[J/mol·K]

表2 構造緩和の応答関数

Volume Decay Function	
Relaxation Time( $\tau_i$ )	Wi
630	0.13
3100	0.3
13000	0.57
Shear Modulus Relaxation	
Relaxation Time( $\tau_i$ )	Wi
70	0.26
350	0.27
2200	0.47

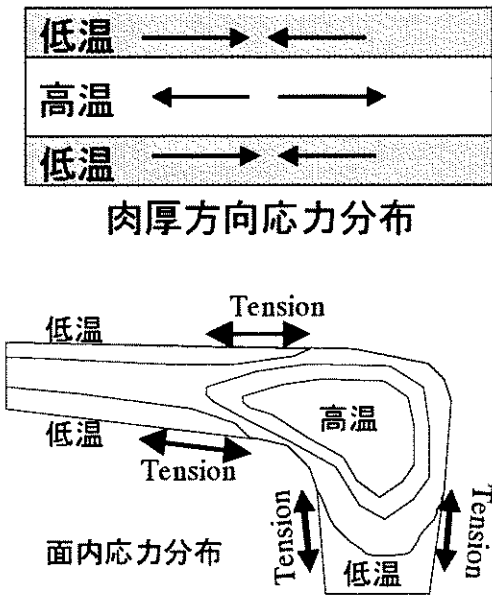


図6 ガラスの応力発生機構例

が発生する。(図6の上図)。しかしブラウン管のような形状では、平面方向の温度分布に起因した面内応力分布が発生する(図6の下図)。図5で表面に引張り応力が発生する部位は、肉厚方向応力による表面付近の圧縮応力と面内応力の合力が引張りになっていることを示している。

この肉厚方向応力と面内方向応力の最高徐冷温度に対する関係を図7に示す。横軸は基準温度で無次元化した徐冷炉内の最高温度で、縦軸はその時の残留応力で無次元化した残留応力

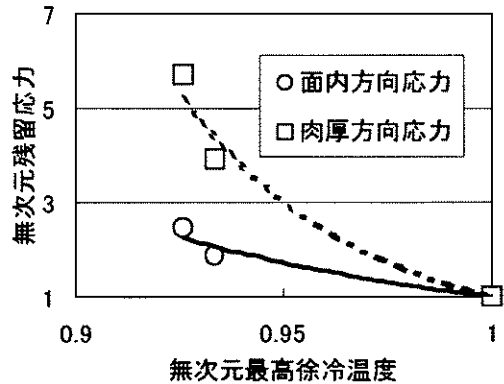


図7 応力の徐冷温度に対する変化

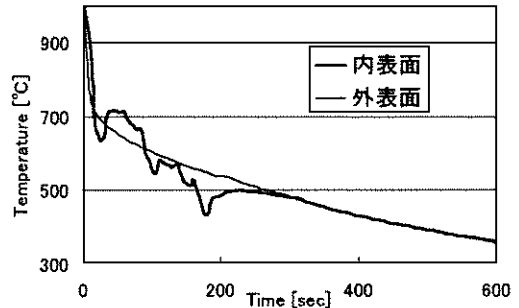


図8 改善した温度分布履歴

を示す。図7において徐冷炉温度の上昇に伴い応力緩和が進行するが、強化応力に比べ平面応力は緩和し難い傾向にあることがわかる。このため引張り性の平面応力は、できるだけ徐冷前に低減あるいは発生因子を除去することが重要なポイントとなる。

そこで徐冷前に生じるパネル温度分布を制御する方法を検討した。図5において生じている引張り応力は、図4より、冷却工程中に一時的に内面と外面の温度差が均一に冷却されなかったことに着目し、内外面の温度差を図8のように低減することを試みた。その結果、図9のような応力分布になり、図5で生じていた引張り応力は低減することができる。

このように徐冷によって除去し難い不要な引

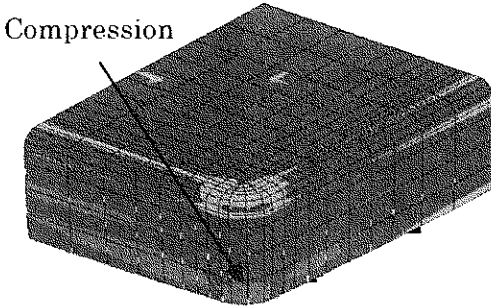


図9 平面応力の改善結果

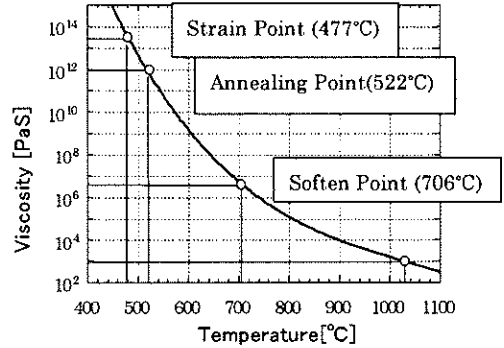


図11 パネルガラスの粘性の温度依存性

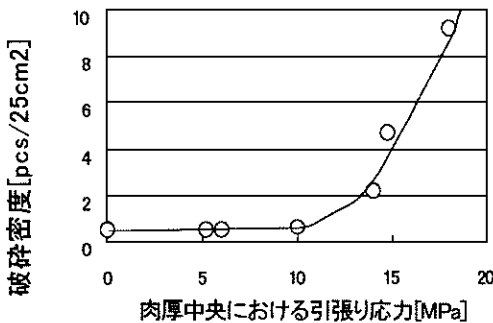


図10 残留応力と破砕密度の関係

張り性の平面応力を、あらかじめ徐冷前に低減するプロセスを設けることで、必要な応力を残留させながら割れにくいパネルガラスを製造することができる。

### 3.2 徐冷条件の選定

ブラウン管用ガラスの徐冷は、一般的にトンネル式レア (Lehr: 連続徐冷窯) を利用して行われる。レアは主に加熱・徐冷調整・急冷の3つの機能を持たせた温度や搬送速度等を調整したゾーンを、ガラスが通過する事によって所望の応力緩和を行う。

目標とすべき応力は、ブラウン管の機能として破砕細片化を防止できる応力レベルが上限値である。

パネル内面中央部を割るハンマーテストの結果を図10<sup>6)</sup>に示す。肉厚中央における引張り応力が、10 MPa 以上の場合、急速に破砕の細片化が進むことが確認できる。このため肉厚中

央の引張り応力を 10 MPa 以下に制御すると共に、ブラウン管として十分な強化応力を残留させ、生産性を確保した徐冷条件を選定する必要がある。この応力レベルは、自動車用ガラスに用いられている物理強化による応力に比べて約5分の1程度の大きさであり、一般的な板状ガラスの物理強化に比較して低い応力である。

図11にブラウン管用パネルガラスの粘性の温度依存性を示す。一般的にガラスを完全徐冷するためにガラスの徐冷点温度 (Annealing Point) 以上で15分以上保持すれば十分に応力緩和が行われる。通常の球面ブラウン管ガラスも、この考え方に従って安定的に生産性を確保した徐冷スケジュールを設定している。つまり520°C以上にレア内の最高温度を設定し、15分以上保持する事を基本設定にしている。

しかし“TLIPRED”の生産時には、一定の残留応力を残す必要がある。徐冷スケジュールを決定するために、条件や品種毎に多様な徐冷条件を粘弾性解析によって決定するのは、計算時間や精度の点で実用性に欠けるため、簡易計算により徐冷条件の物理的な特性を把握することが重要である。そこで次のような簡易モデルを提案する。

一定温度  $T$  におけるガラスの粘性変形による応力緩和では、残留応力  $S$  の時間変化は、Twyman<sup>7)</sup>の式と Adams & Williamson<sup>8),9)</sup>の式

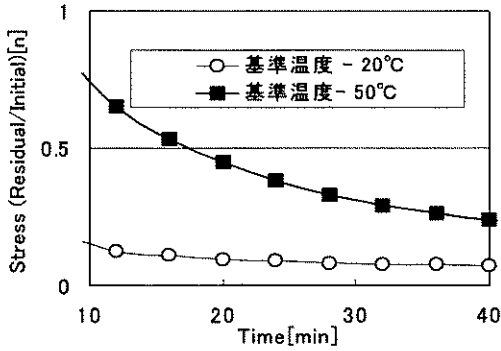


図12 ブラウン管用パネルの応力緩和特性

の和とすると、

$$\frac{dS}{dt} = -\alpha S - \beta S^2 \quad (2)$$

と表せる。ここで  $\alpha, \beta$  は比例定数である。応力除去時間と  $t_c$  とし時間  $t$  を無次元化したとき、粘性による挙動が同一のパラメータを有する(2)式で表せると仮定する。(2)式を解くと以下の式が得られる。

$$S = S_0 \left\{ 10^{at_m + \frac{1}{bt_m + c}} \right\} + d \quad (3)$$

$S_0$  : 徐冷前の熱応力,  $t_m = t/t_c$  : 緩和開始後の無次元時間,  $a, b, c, d$  : 積分定数

積分定数は、実験値からの実績対比を行って決定した。この計算手法から得られたガラスの応力緩和の特性を図12に示す。縦軸は(3)式における  $S/S_0$  に相当する無次元化した応力であり、横軸は徐冷時間である。

図12より、応力の緩和は時間に対する依存性より温度依存性が強いことがわかり、また時間に対する応力緩和特性が温度によって大きく異なることがわかる。このような応力緩和特性を時間毎に定量的に把握することで、温度プロファイルや搬送速度を決定でき、徐冷スケジュールを決定できる。

### 3.3 徐冷炉内でのパネル温度

徐冷スケジュールが決定されても、実際に目標通りに応力を残留させることができないことがある。通常レアでは一定の温度制御単位のゾ

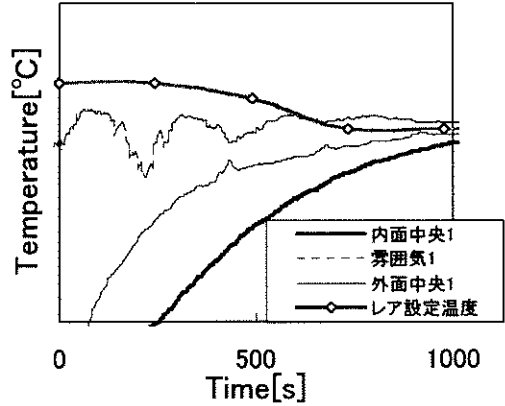


図13 レア入り口付近温度実測例

ーンに分かれている。目標応力を実現する徐冷条件は、各ゾーン毎に温度を設定することで制御し、搬送速度を一定にすることで徐冷スケジュールを実現させる。

しかし実際のガラスを徐冷スケジュールにするためには、各ゾーンの温度設定を目標の温度にすれば良いというわけではない。

図13は、レア入り口付近の設定温度とガラス及び雰囲気温度の測定結果の一例である。この例において、雰囲気温度は変動し500 sec程度にならないと安定しない。またガラスの温度は、レア入り口以前ではレア温度以下に表面温度を制御されているため、目標温度に到達するまでに時間が掛かっているだけでなく、内・外面でも目標温度に到達する時間が異なっていることがわかる。このような現象がレア内の他の場所でも生じていることが予想されるので、実際にガラス温度を計測し、ガラスが目標徐冷スケジュールになるように補償することが重要である。

## 4. おわりに

物理強化パネルガラス“TLIPRED”は、従来のガラスに生じている応力を完全に緩和する技術と異なり、最適化された残留応力を有し、応力の分布を制御する徐冷技術を利用して

る。この徐冷技術のポイントは以下の通りである。

- (1) 過剰な平面方向の引張り応力は緩和し難いため、あらかじめ温度分布の調整を行って平面応力を低減する操作を行った後、徐冷する。これはパネルが3次元的な形状を有しているため、部分的に冷却速度のずれが生じてしまうためである。実際には内・外面の温度差を徐冷前に低減する等の温度制御することによって、平面応力を低減できる。
- (2) 適切な残留応力とそれを実現する徐冷スケジュールの目標値を設定する。目標残留応力は、ガラスが破砕時に細片化しない肉厚中心部の引張り応力が10 MPa以下になるように設定し、徐冷温度及び時間等を制御する。
- (3) 目標徐冷スケジュールを、ガラスに適応させる必要がある。一般的に実ガラス温度と炉内設定温度は一致しないことが多い。このため炉内のガラス温度履歴を実際に計測することが重要であり、レア設定はその実績を考慮して、ガラス温度を補償するように設定する必要がある。

以上徐冷技術を中心に“TLIPRED”生産技術の一端を紹介したが、“TLIPRED”は三次元形状を有するガラスの応力形成や緩和現象の複雑さを明確にし、平面ブラウン管の実現やブラウン管の軽量化に大きく貢献している技術である。

#### 参考文献

- 1) W. Laffs and G. Sedlacek: *Glastech. Ber. Glass. Sci. Technol.*, 72, pp. 814 (1999), No. 1.
- 2) W. Laffs and G. Sedlacek: *Glastech. Ber. Glass. Sci. Technol.*, 72, pp. 4248 (1999), No. 2.
- 3) T. Sugawara et al.: *Proc. IDW 98* pp. 429- (1998).
- 4) O. S. Narayanaswamy: *Glass: Science and Technology*, vol. 3, pp. 275-317 (1986).
- 5) O. S. Narayanaswamy: *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 61, No. 3-4, pp. 146-151, (1978).
- 6) J. Nishihama et al.: *13.2 SID 99 DIGEST* pp. 140-143 (1999).
- 7) F. Twyman: *J. Soc. Glass Techn.*, 1: 62. (1917).
- 8) L. H. Adams and E. D. Williamsom: *J. Franklin Inst.*, 19 (1920).
- 9) 山根正之等: *ガラス工学ハンドブック*, pp. 379-389 (1999).