

## 第2回 “割れないガラスを目指して”

旭硝子(株)中央研究所 ニューガラス開発研究所長  
国分可紀

“Some methods to obtain a strong glass”

Yoshinori KOKUBU

Manager, New Glass Research and Development Center  
Asahi Glass Co., Ltd. Research Center

### Abstract

There are many available techniques to avoid mechanical failure of glass. The appropriate choice of a technique depends on many factors, e.g., typical failure stress during service, type of stress (i.e., mechanical or thermal), thickness of glass and associated safety. One of the more common methods to avoid failure in glass is physical tempering, which is widely used for automobile and architectural window glass. For safety reasons in certain applications, surface compressive stress value is controlled to obtain a desired frangibility. Chemically tempered glasses are used for some special applications such as airplane window and magnetic disks. To avoid failure by thermal shock, low thermal expansion glasses are used for cooking ware, chemical apparatus and fire proof windows. Much research is being carried out to obtain an unbreakable glass by enhancing its strength and toughness.

### 1. はじめに

前稿では、ガラスは何故割れやすい材料なのかを考えた。ガラスは本質的に脆性材料であり、破壊がカタストロフィックに起こるのは、ある意味で宿命であるかもしれない。そこで、実際に使用されるガラスでは、如何に割れにくくするか、また、万一割れたとしても如何に安全性を確保するか、様々な工夫が凝らされている。

本稿では、このような目的のためにガラスに施されている様々な技術的な手法について述べ、また、割れないガラスの実現に向けてのアプローチについても考えてみたい。

### 2. 板ガラスの風冷強化と安全性

自動車用、あるいは建築用として、多くの板ガラスが使用されているが、これらはガラス製品の中ではサイズが大きな物が多いだけに、無防備な破損は、下手をすると人命に関わる問題ともなる。板ガラスを割れにくくするため、あるいは万一割れた場合に備えてどのような工夫が施されているか、まず見てみよう。

前稿で述べたように、ガラスの破壊は、特殊な場合を除いては、表面に発生した引っ張り応力がキズの大きさによって決まる許容値を上回った結果、一気に生じる。そこで板ガラスを実用的に強くする手段として、その表面にあらかじめ圧縮応力層を形成しておき、引っ張りの力

が働きにくくする方法が用いられる。風冷強化法はこのための代表的な方法であり、自動車のサイドおよびリヤガラスは、この方法により強度を増大するとともに、万一割れた場合にも細かな破片となり、人体を傷つけないようにしてある<sup>(1)</sup>。

風冷強化ガラスは約 700℃に再加熱された板ガラス表面に空気ジェットを吹き付けて製造される。空気ジェットによってガラス板表面は急冷され、内部との間に温度差が生じる。ガラスの温度が高く、柔らかい状態では表面と内部に温度差があっても歪は生じない。温度差を保ったまま冷却してくると、次第にガラスは固まり歪が生じるが、最終的に室温で温度差がなくなった状態では、もとの温度差に応じた分の歪が、表面に圧縮、内部に引っ張り応力となって残存する。

図1に風冷強化ガラスの断面応力分布の例を示す。一般的には表面に与えられる圧縮応力の大きさは 900~1500kg/cm<sup>2</sup>、圧縮応力層の深さは板厚の約 1/6となり、これによりガラスの強度は強化前に比べ、3倍~5倍になる。また、ガラスが割れる際は、内部の引っ張り応力層を起点として一瞬のうちに全体が粉々となるのが特徴である。このため、万一ガラスが割れた際も、破片は鋭利な部分をもたず人体を傷つける

等の危険がない。

ところで、同じ自動車用ガラスでも、フロントガラスでは安全のために要求される特性が他と異なっている。自動車の正面からの衝突事故の際、ドライバーがさらされる最も高い危険は、フロントガラスを頭部が突きやぶることによってもたらされる。また、フロントガラスは亀裂が入った場合にも、良好な視界を確保しなければ危険この上ない。それ故、現在日本を含む先進国では、強化ガラスではなく、更に安全性の高い合わせガラスが用いられている。2枚のガラスの間にプラスチック膜をはさんだこのガラスは、衝突事故の際にも人体頭部を貫通させず、ドライバーの命を守る役割をする。最近ではさらに安全性、軽量化を目指し、外側はガラス、室内側はウレタン膜の2層構造にしたパイレータガラスが開発され、フロントガラスとして使われようとしている。

さて、一方、建築用板ガラスでも風冷強化したガラスが使われるが、粉々になる強化ガラスは、直接人体の衝突が懸念されるような部分でのみ使用されている。建築用の多くの場合は、万一の破損の際に窓枠から脱落しないことが必要であり、同じ風冷強化ガラスでも、表面の圧縮応力の大きさを 200~600kg/cm<sup>2</sup>に調整したものが使用される。この程度に応力値を調整し

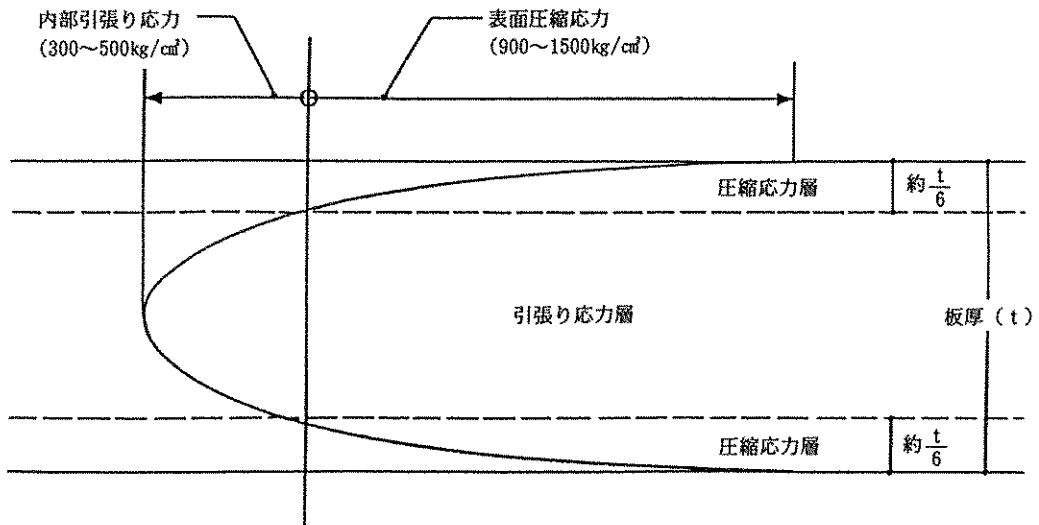


図1 強化ガラスの断面応力分布

たガラスでは、強度はもとの約2倍となり、また破損状況は通常の板ガラスと同様で、亀裂が入っても一気に粉々となることはなく形が保持される。

以上のように、一口に板ガラスと言っても、使用される箇所に応じて割れに対する様々な安全性が必要となり、そのためいくつもの種類のガラスが使い分けられている。

### 3. 化学強化ガラス

上に述べた風冷強化とは別に、ガラス表面の組成をイオン交換等の方法で変えることによって圧縮応力層を形成し、ガラスを強化する方法がよく知られている。風冷法による強化を物理強化と呼ぶのに対し、この方法は化学的な反応を利用するので、化学強化という<sup>(2)</sup>。一番広く用いられている方法は、小さいイオン半径のアルカリイオン(LiやNa)を含んだガラスを、そのガラス転移点温度以下の温度域(例えば400°C)で、大きなイオン半径のアルカリ溶融塩に浸漬することによって、ガラス表面で両者のイオン交換を行わせるものである。この結果、ガラス表面層では容積が増大し冷却後圧縮応力が存在する状態となる(図2)。

イオン交換法による強化ガラスの断面応力分布の例を図3に示す。この方法では、風冷強化よりも更に大きな圧縮応力層を形成することができ、風冷強化による強度の2倍以上の強度を得ることができる。しかし、一般に表面圧縮応力層の深さは、風冷強化によるよりも浅く、内部には大きな引っ張り応力が残存しないため、破損しても粉々になることはない。また、形状や物品の厚み等の制約もなく、そのうえ処理温度がガラスの変形を引き起こすよりはるかに低いので、高い寸法精度が得られるという利点がある。反面、短所としては、処理時間が長くなることや、特に大きな製品に応用する際は装置が大がかりなものとなりコスト高を招きやすい、

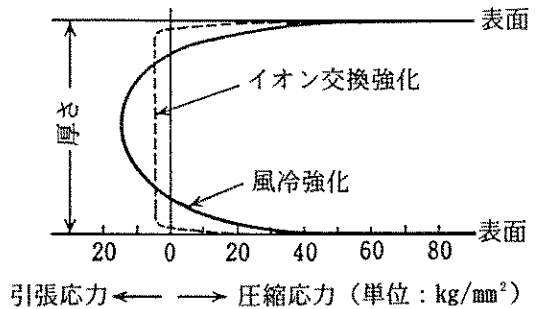


図3 イオン交換法によるガラス断面の応力分布

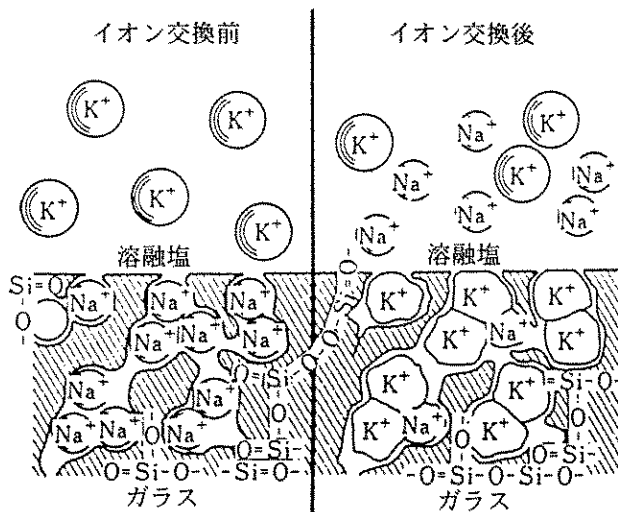


図2  $\text{Na}^+ \rightarrow \text{K}^+$ 交換によるガラスの強化原理

等があげられる。このため現在では、高付加価値製品や、高い安全性が要求される製品等に主に用いられている。これらの具体例としては、腕時計のカバーガラス、複写機の原稿保持板、航空機用窓ガラス、ガラスディスク基板等がある<sup>(2)</sup>。

#### 4. 低膨張ガラス

ガラスが割れてしまう原因は様々であるが、ガラスを急熱、急冷することによって割ってしまった経験は、誰ももちであることだろう。ガラスの一部が急激に熱膨張あるいは熱収縮しようとしたため、熱応力が生じて破壊してしまうわけであるが、家庭で使う調理器具や化学実験に使用されるガラスは、電子レンジで加熱されたり、バーナーの炎にさらされたりしても容易に壊れることはない。これらのガラスは、普通の板ガラスやびんガラスに比較すると、はるかに低い熱膨張係数を持ったガラスである。このため急激に温度差を与えても、ほんのわずかな熱応力しか発生せず、壊れることがない。このような低膨張のガラスは熱に対して割れないガラスといえるだろう。

近年、このような低膨張ガラスが建物の防火窓としても使用され始めてきた。防火窓は、万一の火事の際に、炎が広がるのを防ぐ機能を持たなければならない。ガラスにワイヤーをはさみこんだ網入りガラスは、割れてもワイヤーがガラスを保持するためこの条件を満足し、現在最も広く使用されている。

#### 5. 割れないガラスを目指して

ガラスを割れにくくするため、また万一割れても安全性を確保するために実際に用いられている様々な手法を述べてきた。この他にも、ガラスの強度を大きくするための様々な試みが行われている。強化法による高強度化を別にする、と、ガラスの本質的な強度は、前稿で述べたよ

うに、表面についているキズの大きさ、弾性率および表面破壊エネルギーによって決まる。これらのうち、素材面からガラスを強くすることは、如何に弾性率と破壊表面エネルギーを大きくするかということである。

ガラスの弾性率を上げる試みとしては、従来の酸化ガラスに窒素を導入する手法がよく知られている。結合力の強い窒素がガラスの網目を強化することによって、3～5割も弾性率を向上できることが知られている<sup>(3)</sup>。現在の所、強化用のガラス繊維としての利用が最も積極的に進められているが、今後さらに大きな製品への応用が期待される手法である。

破壊表面エネルギーを上げる手段としては、マトリックス中に第2相の粒子が分散した複合材料として、破壊のクラックの進行を起りにくくする方法が一般的である。ガラスを再加熱処理して結晶粒子を析出させる、いわゆる結晶化ガラスはこの代表であり、多くの優れた材料が知られている。しかしながら、結晶の析出によって材料の透明性は多くの場合失われ、いわゆる窓材として利用できるものは極く限られている。優れた透明性と高い破壊応力をもった新しい材料の出現が待望される。

ガラスは本質的に脆性材料であり、割れないガラスの実現はたやすいことではないだろう。しかしながら、透明で割れないガラスの実現は、ガラス材料開発者のみならず、万人の抱く夢であろう。この分野の研究がますます進化し、いつの日か夢が現実になることを願ってやまない。

#### 参考文献

- (1) 作花濟夫編 “ガラスの事典”、朝倉書店、1985、P302
- (2) “機能性ガラスの開発と応用”、シーエムシー、1985、P180
- (3) 泉谷徹郎 “新しいガラスとその物性”、経営システム研究所、P651