
やさしいニューガラス講座

第1回 ガラスは何故割れるか

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

Why does glass break

Yoshinori KOKUBU

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

Abstract

It is often thought that a glass material is very easy to break. The strength of a glass is determined by Griffith flaws that exist on its surface. Although the typical strength of a glass is not as low as those of many metals, e.g. aluminum, tin and lead, but, their fracture behaviors are quite different. Most metals show plastic deformation before fracture, so that the nature of their failure is ductile. On the other hand, a glass material does not show any plastic deformation before fracture, so that the nature of its mechanical failure is brittle. This means that the failure of a glass is essentially catastrophic. That is why a glass seems to be very easy to break.

〔筆者紹介に代えて〕

国分さんの旭硝子入社は昭和38年。折りから、わが国の石油化学は騎虎の勢いで発展中。「割れやすい」という欠点をもつガラス材料はゆくゆく高分子材料に席卷されるのではないかと危惧を感じたという。

旭硝子ス軍用航空機用に強いニーズのあった割れないガラスであるメチルメタクリル樹脂(MMA)開発のわが国のパイオニア。MMAの仕事は太平洋戦争中の企業統合で日本化成に、そして戦後の企業分割では工場が広島県の大竹にあったため三菱レイヨンに移行。昭和30

年代になって旭硝子技術陣は手塩に掛けたMMAを手放す羽目にならなかったなら、旭硝子のガラス技術と有機合成技術と組み合わせもっと大きく育てることができたものをと、無念さに臍を噛んだという。

時は移り変わってそれから30有余年。今や国分さんはニューガラス開発研究所長として旭硝子の研究開発陣を率いる総師。国分さんの危惧は杞憂に終り、ガラス材料もその長所が認識され高分子材料と同様ハイテクを支える新素材として活躍している(T. M)

1. はじめに

住宅用の窓ガラスといえば、昔は結構よく割

〒221 横浜市神奈川区羽沢町1150
Tel. 045-334-6051

れたものであった。広場で子供たちが遊んでいたボールがぶつかろうものなら、窓ガラスはいつも簡単に大きな音と共に壊れてしまった。しかし最近では窓ガラスが割れることも珍しくなった、と感じるのは、板ガラスメーカーに勤める筆者だけではあるまいと思う。子供たちの遊ぶ環境が変わってきていることもむろんであろうが、実は住宅用に使用される板ガラスの厚みが増えているのだ。窓ガラスの標準厚みはひとところ2mmであったが、最近では3mmになっている。窓ガラスは確かに割れにくくなっているのである。

しかし、ガラスという言葉を知ると、たいいてい人は脆いもの、壊れやすいものを連想する。事実、私たちが身近に持ち運びができるガラス製品、例えばコップや鏡等をぶつけたり床に落としたりすると容易に壊れてしまう。窓ガラスは先ほど述べたような理由で、身近に割れやすさを経験することは少なくなってきたとはいえ、家を構成する材料の中ではやはり最も割れやすいもののひとつであろう。

しかし、では一体、何故ガラスは割れやすいのだろうか？ガラスの繊維がプラスチックやセメント等の補強材として広く用いられていることはよく知られた事実である。ガラスの強度とは本質的に高いのだろうか、低いのだろうか？

本稿ではガラスの強度を他の材料のそれと比

較しながら、ガラスは何故割れやすい材料なのかについて考えてみたいと思う。

2. ガラスは何故割れやすいか？

ガラスの実用強度の値を表1に他の材料と比較して示す¹⁾。この表からわかるように、ガラスの引張り強度は例えば他の金属材料と比較して小さいわけではなく、アルミニウムのそれと比較するとほぼ同等であり、金属スズや鉛のそれと比較するとはるかに大きい。にもかかわらずガラスの方が割れやすいのは、ガラスの破壊の仕方が金属材料とは全く異なるためである。

ガラスおよび金属材料に力を加えていったときの挙動について考えよう。いずれの材料でも、力を加えるに従って材料は変形するが、力があまり大きくないうちは、それを取り去ると元の形状に戻る（弾性変形）。大部分の金属材料では、力を加え続けると弾性変形の限界を越え、もはや元の形に戻らないような変形が起こる（塑性変形）。そして更に力を加え続けると、徐々に破壊が生じる。一方、ガラスでは塑性変形はほとんど全く起こらず、破壊は弾性変形の限界内で生じる。つまりガラスは力を加えていくと割れてしまうか、力を緩めると元に戻るかのいずれかであり、金属などのように歪んだまま、曲がったままの形状になることで力を逃がすことができない。このことは、破壊の瞬間に

Table 1 Comparison of mechanical properties for various kinds of materials.
表1 種々の材料の力学的性質の比較^{1,2)}

材 料	ヤング率 (kg/mm ²)	ポアソン比	引張強さ (kg/mm ²)	引張強さ/ 密度
アルミニウム	7,140	0.35	6.3	2.32
銅	12,240	0.35	27.5	3.02
スズ	4,080	-	2.8	0.49
鉛	1,530	0.43	1.4	0.12
鉄	9,180	0.27	10.6	1.34
軟鋼	22,440	0.28	42.2	5.28
ガラス	6,120	0.23	7.0	2.82
シリカ	7,140	0.14	-	-
グラファイト	3,060	0.3	11.4	4.93
ポリスチレン	350	0.33	4.2	3.94
ゴム	2	0.49	1.4	1.55

は、塑性変形する材料に比べて材料に加わっている力は大きいということになり、強度は高いが、破壊は一気に進む。これはつまりガラスが脆いということであり、ガラスは脆性材料であるため割れやすいのである。

いわゆるセラミックスもガラス同様脆性材料であり、破壊は弾性変形の限界内で起こる。しかし、同じ脆性材料であっても、例えば焼結セラミックスでは粒界の存在によって破壊のクラックの伸展が阻害されたり曲げられたりする。つまり、破断面を形成するために、より大きな仕事を必要とするため、破壊に対する抵抗力を持たせることができる。これに対し、ガラスは構造的に均質であるため、クラックの伸展は一気に進んでしまう。

以上2つの理由により、ガラスはたとえ強度はそこそこ高くても、非常に割れやすいという特徴をもつわけである。

一方、例えば高分子材料であるポリスチレンもガラス同様脆性材料であり、クラックの伸展を止める粒界もなく、しかも一般的に引張り強度はガラスのそれよりも小さいので、数字の上ではガラスよりも割れやすい材料であると考えられる。ところが「強度/比重」というインデックスをとってみると、表1にみられるように数字はガラスと逆転する。このインデックスは、例えば両方の材料を同じ高さから床に落下させたときに、材料が受ける衝撃に対していかに割れにくいかを示すと考えられる。つまり日常私たちが容易に体験できる感覚では、ガラスの方が「割れやすい」こととなるわけである。

3. ガラスの理論強度と実用強度

破壊とは物質を構成する原子間の結合を切断し、新しい面を形成することであり、それに要する単位面積当りの力が破壊強度である。まず、図1(a)に示すような2原子モデルを考える。この2原子間のポテンシャルエネルギーを図1(b)に、この2原子を平衡位置 a_0 から x だけ引き伸ばすために必要な力 σ を図1(c)に示す。 σ の

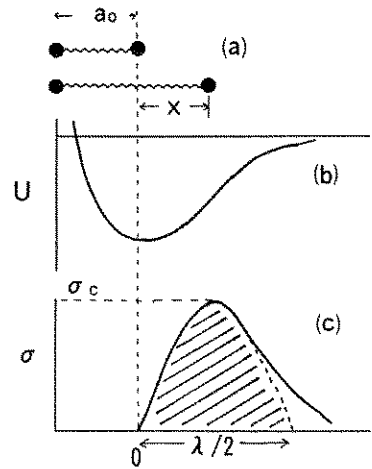


Fig. 1 Schematic diagram of the potential function U and stress σ for atomic bonding as a function of atomic separation.

図1 2原子モデルの原子間距離とポテンシャル U および応力 σ の関係

臨界値である σ_c を越える力が加えられると破壊が生じる。一般に σ は次式で近似することができる。

$$\sigma = \sigma_c \sin(2\pi x / \lambda) \quad (1)$$

x が小さい時、

$$\sigma = \sigma_c (2\pi x / \lambda) \quad (2)$$

また、 σ はヤング率 E と歪 ε から

$$\sigma = E\varepsilon = Ex / a_0 \quad (3)$$

となる。(3)式を(2)式へ代入すると(4)式が得られる。

$$\sigma_c = E\lambda / 2\pi a_0 \quad (4)$$

一方、破壊によって2つの表面が生成する。その表面エネルギー γ は図1(c)の実線の下側の面積で与えられるが、一般に斜線の面積で近似される。

$$\gamma = (1/2) \int_0^{\lambda/2} \sigma_c \sin(2\pi x / \lambda) dx = \lambda \sigma_c / 2\pi \quad (5)$$

(4)式と(5)式から、次式が得られる。

$$\sigma_c = (E\gamma / a_0)^{1/2} \quad (6)$$

SiO_2 ガラスの理論強度を、 $E = 7000 \text{ kg/mm}^2$ 、 $a_0 = 2 \text{ \AA}$ 、 $\gamma = 3 \times 10^{-5} \text{ kg/mm}^2$ の値を使って求められると、 $\sigma_c \approx 1000 \text{ kg/mm}^2$ が得

られる³⁾。

実測された SiO₂ ガラス繊維の最高強度は、室温で約 900kg/mm²、液体窒素温度で約1400 kg/mm² である³⁾。これらの値はほぼ理論値と同程度で、ヤング率の 1/5~1/10である。

さて一方、普段の私たちが使用しているガラスの実用的な強度は、通常およそ 5 kg/mm² から10kg/mm² であり、上述の理論強度の 1/10 から 1/100 にすぎない。これは普段私たちが使用するガラスの表面にはミクロな傷があり、そこに応力集中が起こるためである。Griffith 理論⁴⁾によればガラスに図2のような長さ 2c のクラックが存在する場合の強度は次式で表される。

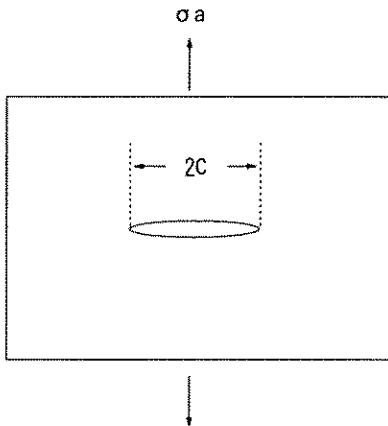


図2 グリフィスのクラック
Fig. 2 Griffith flaw

$$\sigma_c = (2 E \gamma / \pi c)^{1/2} \quad (7)$$

この式によれば、例えばガラスの強度を 7 kg/mm² とすると、クラックの長さは 0.2 μm となる。そしてガラスの実用強度は、クラックの長さに応じて(7)式で決定される。

このようにガラスの強度そのものは材料表面についている傷の大きさが直接左右する。ガラスをダイヤモンドカッターで切断する際に、意図的に深く長い傷を表面につけると、ガラスはいとも簡単に破断する。逆に、ガラスの強度を大きくするためには、表面に傷をできる限りつけなければ良いことになるが、現実的問題としては限度がある。では、如何にしてガラスを割れにくくするか? 次稿ではガラスを割れにくくするための様々な手法について考えてみたい。

参考文献

- 1) 大場洋一 “ガラス表面設計” 近代編集社, p30
- 2) 原守久 “セラミックスの機械的性質” 窯業協会, (1979), p49
- 3) B. A. Proctor, I. Whitney and J. W. Johnson, Proc. Roy. Soc., A297, 534 (1967)
- 4) A. A. Griffith, Phil. Trans. Roy. Soc., A221, 163 (1929)