

ガラスの破壊メカニズムと高強度化

日本板硝子（株） グループファンクション部門 研究開発部 日本統括部

千 秋 裕

Fracture Mechanism and Strengthening Method of Glass

Yutaka Senshu

R&D Japan, Group Functions, Nippon Sheet Glass Co., Ltd.

ガラス科学におけるフロンティアの一つである、ガラスの破壊現象と強度に焦点を当てた書籍がR&D支援センターから刊行された。著者はいずれもこの分野における第一人者である。下記の通り全5章からなり、計92ページと手ごろなサイズで内容も読みやすくまとめられている。

第1章 ガラスの破壊メカニズム：

滋賀県立大学 松岡純

1. はじめに：ガラスの基本的な特徴，ガラスとは何か，ガラスの破壊の概要
2. 脆性材料としてのガラス
3. ガラスへの応力発生
4. ガラス固有のクラック発生とクラック伸長

第2章 ガラスの高強度化技術：

東京工業大学 伊藤節郎

1. はじめに
2. ガラスの強度
3. 高強度ガラスの組成設計

4. ガラスの高強度化手法

第3章 ガラスの化学強化：

日本板硝子株式会社 長嶋廉仁

1. はじめに
2. 化学強化の方法
3. 強化の方法
4. ガラス組成
5. 化学強化したガラスの性能
6. 化学強化の改良法

第4章 携帯ディスプレイ用カバーガラスの強化と評価の事例：

株式会社機能性ガラス研究所 藤田卓

1. はじめに
2. 世界のモバイル市場とカバーガラス
3. カバーガラスに求められる基本特性
4. 各種カバーガラスの化学強化による強度比較例
5. カバーガラス用材料の将来動向

第5章 ガラスの破損事故解析：

地方独立行政法人都立産業技術研究センター 増田優子

1. はじめに
2. ガラス製品の破損事故解析
3. 破損事故解析の進め方

〒664-8520 兵庫県伊丹市鴻池 2-13-12

TEL 072-781-0081

FAX 072-770-4419

E-mail: yutaka.senshu@nsg.com

この分野は最近、スマートフォンやタブレットに化学強化ガラスが採用されたことから脚光を浴びており、新製品が次々と発表されるさまは百花繚乱の趣がある。破壊現象のその場観察など実験技術の進歩に加え、近年では分子動力学による破壊過程の解析や化学結合のトポロジーに基づく物性予測など新たな手法も構築されてきており、今後のさらなる発展が期待される。以下、章立てに沿って内容を紹介したい。

第1章 ガラスの破壊メカニズム

ガラスは脆性材料であり、金属やプラスチックのような塑性変形を生じない。それではセラミックスとの違いは何だろうか。本書では、ガラスが等方な長距離秩序を有し、結晶に比べて密度が低い、という本質的な差異が破壊挙動の違いとなって表れる点を強調し、読者を惹きつける。記述は懇切であり、初学者が抱くであろう疑問、例えば数十 nm 程度のキズが目視では検出できない理由にも答えている。実用面から、キズ先端がなまった場合の破壊靱性値の取り扱い、ワイブル分布におけるサイズ効果の考え方（基板の大型化に対して）など、参考になる部分が多い。

クラックの発生に関して、著者らの最近の研究も紹介されている。ビッカース圧子の除荷後もガラスには応力分布が残るが、このとき高密度化しやすいもののほどクラックが発生しにくい（Bは3配位ものが該当する）。一方、引っ掻きの場合は押込みによるクラック発生しにくさと相関しないとのことであり、まだまだ未知の部分が多い。発生したクラックはその後どうなるのであろうか。じつは最初は微小な亀裂であっても応力がかかり続けると、最終的には急速で巨視的な破壊につながるのである。初期クラックの大きさを予測できれば、理論上は破壊に至るまでの寿命が予測可能となる。こうした話は大変興味深い、基礎データの収集が手間なのでは？と感じた。

総じて読みやすく書かれており、内容も掘り

下げられている。強度の取り扱いについても「かゆいところに手が届く」記述が随所に散見され、実用にも役立つ構成になっている。この分野で実績を積んできた著者ならではの配慮といえよう。

第2章 ガラスの高強度化技術

ビッカース圧子の押込みではガラスに様々な変形やクラックが発生する。これを経時的に解析するとどうなるのか？が前半部で紹介される。本書では触れられていないが、ガラス組成がnormalかanomalousであるかによって発生するクラックの種類が異なるという議論もなされており、個人的には大いに興味のそそられるテーマである。

どうすればクラック発生を抑制できるか、という点について本章では「脆さ」＝「硬度／破壊靱性」に着目したアプローチをとっている。脆さが低いガラスほど流動、緻密化しやすいため、クラック発生を抑制するには好ましい。実際に開発されたLow Brittleness Glassはソーダライムガラスより傷つきにくいことから、有力な指針であろう。分子シミュレーションを援用した空隙構造の考察もなされており、斬新さを感じさせる。さて、1章の冒頭で触れたガラスとセラミックスの違いは何であったろうか。本章ではガラス構造自体に脆さの起源を求める考察がなされており、大変参考になる。

具体的な強化技術としては従来法（物理強化、化学強化）のほか化学研磨、コーティング、結晶化、微粒子分散による高靱性化、など広範な手法がカバーされている。意外にも水による強化という項目があり、思わず目を引いた。一見すると直感に反するが、ガラスの奥深さを思い知らされる事実である。ぜひ本書を手にとって確認して頂きたい。

第3章 ガラスの化学強化

本章では化学強化の原理が解説される。一口に化学強化といっても、歴史的には原理の異な

る複数の方法が提案されている。こうした背景を知ると、理論的に可能であることと採算がとれて普及することとの隔たりを感じずにはいられない。記述は理論と実践のバランスが考慮されており、応力の発生・緩和につづいて溶融塩の汚染と対策に関しても紙幅が割かれている。

その後、議論はガラス組成と化学強化の関係に移る。ここでは $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ の 2 成分系ガラスに MgO , Al_2O_3 , ZrO_2 など各種酸化物を添加したときの加傷、未加傷強度の変化がまとめられている。強度の組成依存性に関して、非架橋酸素の増減と関連付けた議論は説得力がある。余談だが、筆者などはこのテーマで論文が少ない事実至今已さらながら驚かされてしまう。類書にない最新の知見も紹介されており、ガラス中で Na と Mg はペアになりにくい、Na と Ca はペアを形成しやすい。このことが Na 拡散経路の差異となって表れるという考え方であるが、ナノスケールの構造不均一性に着目したところが面白い。

本章の特徴として、強度はすべて破壊試験の測定値に基づいており、加傷試験の事例が多いことが挙げられる。近年、カバーガラスのカタログには表面応力と圧縮応力層深さの値が記載されているが、これらが必ずしも破壊強度と対応しないことは経験者には周知であろう。本章の記述はデータとしては古い、実際の使用条件により即したものと言える。ところで、このような「古くて新しい」技術に発展の余地はあるのだろうか。たとえば常温で液体の無機イオン液体を用いれば、低融点ガラスも化学強化できるかもしれない。

第4章 携帯ディスプレイ用カバーガラスの強化と評価の事例

本章はモバイル機器の化学強化用カバーガラスについて、市場トレンドをふまえた技術動向を解説している。まず、なぜガラスが使われるのか、という点が問題になるが、実はこれが判然としない。1) 携帯端末の初期には樹脂製カ

バーが使用されていた、2) その後タッチパネルを搭載したスマートフォンが普及した、3) タッチ面はガラスが主であった、等はいずれも事実であろうが、決め手に欠く。するとやはり、アップル創業者の故・スティーブ・ジョブズの自伝にあるように、美を徹底的に追求する姿勢がガラスを択んだということだろうか。個人の嗜好から莫大な需要が生まれたのだとすると、開発サイドにとっては悩ましい。これからの技術者には芸術的な感性が求められるのかもしれない。

本章の特色は何と言っても、各社カバーガラスの強度を統一的な基準で評価している点であろう。それぞれ強化、未強化品の性能を 1) 曲げ強度、2) 衝撃強度、3) 応力、4) 表面硬度、5) 反り、6) 加工性、の 6 項目で比較したものをグラフ化しており、優劣が一目瞭然である。各社の製品カタログでは評価の基準がバラバラなので、その意味でここに記載された情報は有用である。ただし、強度評価は加傷試験でない、データの見方に注意が必要である。反りが評価項目に入っている点も興味深い、組成だけではなく成形方法にも依存することを考慮されたい。最後に、今後のトレンドは薄型化と強化後切断、3 次元加工とのことである。

第5章 ガラスの破損解析事故

4 章までの内容は、ガラスの強度はどの程度か、それはどのような要因で決まるのか、どうすれば強度が向上するか、という話を中心であった。それでは、ガラスは一体どのようにして割れるのだろうか。本書の最後はガラスの破損に関する小論で締めくくられる。

ガラスは脆性材料であり、塑性変形することなく破壊に至るため、破壊の履歴がそのまま破断面に残る。またセラミックスと異なり、基本的には透明である。両者を組み合わせると、「破面解析」以外にも多くの情報が得られる——というのが著者の主張である。破損事故の場合、

具体的には「破片を収集して復元→およその起点を同定→（クラックの入り方から破壊原因を推定）→破断面のリブマークから起点を確定」という手順で解析する。書くのは簡単だが、なかなか根気のいる作業である。

筆者は以前、瓶ガラスの破損解析の講演を聴講したことがあるが、非常に労力と手間を要する仕事であることが伝わって感動すら覚えたものである。しかし冷静に考えてみると、強度試験や破損解析の作業が軽減されれば、もっと高強度ガラスの開発も進みそうである。なにかよい方法は無いものだろうか。

＜最後に＞

本書全体として数式を省いて平易な言葉で説明しようとする姿勢が一貫しており、編者の力量を感じる。応力や強度の評価方法について一章があればなお嬉しいが、欲張りすぎだろうか。近年は地震、台風、竜巻など自然災害が猛威を振るっており、今後は防災用途へも高強度ガラスのニーズが見込まれる。本書はガラス強度に関心のある研究者、技術者にとって必携の入門書と言えよう。お勧めの一冊である。