

板ガラスの破壊、強度、強化

荒谷 眞一 著

序文

ガラスは、金属に代表される種々の材料よりも不燃性、耐薬品性、耐候性など多くの優れた点を持つことから世の中で広く使われている。一方、ガラスは代表的な脆性材料であり、構造材料としての信頼性はこれまでのところ、極めて低い位置にあるといわざるを得ない。例えば、日本における建築物の窓ガラスは建築物の強度を分担する構造部材ではなく、いわば雨や風をしのぐための材料に甘んじているのが現状である。

しかし、ガラスは相応の強さを持っており、その強さに基づいてガラスを構造部材として利用しようとする認識も高まりつつある。ガラスの破壊には材料表層および内層に存在する欠陥あるいは使用時に発生する欠陥が大きく影響を及ぼすが、欠陥のないガラスを使用することは考えられない。当初からこれらの欠陥を念頭に置き、設計することが重要である。ガラスの使用に際しては、所定の破壊強度や寿命を推定するため、数多くの因子との関連性を把握することが必要となる。すなわち、構造材料として実用化する場合、どのような条件で、どのような状態で、いつ破壊するかを十分に把握しておく必要がある。

これらの対応として破壊力学がある程度の回答を与えてくれる。特に、材料を完全弾性体と仮定し、主として弾性論を基盤としてクラックの進展挙動を取り扱う線形破壊力学についてはかなりの部分において有用であるといえる。これらの概念は、クラックを有する部材の強度推定とその設計に寄与するとともに、クラック先端における材料の物理・化学変化に関する微視的現象の研究の助けにもなる。

筆者は、民間企業の研究所に勤務していたときから大学の先生方や仲間とガラスの破壊に関する基礎的な研究を行ってきた。ガラスはセラミックスのひとつであるという考え方もあるように、ガラスとセラミックスの破壊現象では共通しているところが多く、お互いが参考となることも多い。ガラスを取り扱う研究者や技術者がセラミックス領域の考え方を学ぶことにより、セラミックスを取り扱う研究者や技術者がガラス領域の考え方を学ぶことにより、お互いの視野は大いに広がると思われる。しかし、ガラスやセラミックスの破壊現象に関して述べた書は意外と世の中に出されていない。実際に必要とされる実用的なレベルを説明した書も、ガラスとセラミックスの破壊現象を同時に示した書も世の中にはほとんどないのが現状である。一方、破壊力学について書かれた書は数多いが、入門書レベルと専門書レベルでの差が大きすぎ、両者の中間的な意味合いを持つ書が少ないという問題もある。このような状況から、ガラスやセラミックスの破壊現象に関し、入門書（実用）レベルから当面必要とされる程度の専門性に的を絞った書が必要であると感じてきた。

本書は、全部で7章から成り立っている。第1章ではガラスの基礎として、ガラスという材料の概念を中心に述べる。

第2章ではガラスの破壊の概要について述べる。ガラスは他の材料と大きく異なるところも多々あるので、破壊の基礎となる事項をまとめて記載した。

第3章ではガラスの強度と強度評価法に関して述べる。近年、ガラスの安全性に対する概念は大きく変化しつつある。従来の割れないという概念から、ガラスの安全性確保や生命・財産を維持できるのであれば割れてもよいとする流れである。本書ではその概念に基づき、従来の割れないという **Strength** レベルの試験法その他、安全性を重視した **Safety** レベル、生命・財産の維持を重視した **Security** レベルの試験法の基礎的な考え方を述べることにした。「安全な国」の日本では、これまでほとんど知られていない試験法である。また、筆者らが開発中の強度評価法も新たな知見と併せて紹介する。

第4章ではガラスの強化について述べる。強化ガラスは一般の板ガラスよりも高強度の商品であり、市場に数多く出回っている。しかし、そのメカニズムやさらなる商品開発につながる知見は意外と知られていないので、簡単に紹介する。

第5章ではクラックの伝播と分岐について述べる。特に熱強化ガラスのクラック伝播と分岐現象は安全性を担保する上でも極めて重要である。しかし、1秒間に約1,500 mも進む高速度現象であるため、その観察も容易ではなく、知られていないことも多かったのが実情である。これまで、あまり知られていなかったいくつかの知見を紹介する。第3章の **Safety** レベルや **Security** レベルの安全性を高める上でも、クラックの高速伝播に関する研究・開発は今後さらに重要度は増すと思われる。

第6章ではガラス切断、第7章では強度測定から見たガラス構造について述べる。ガラス切断はガラスの破壊を逆に利用しているので、簡単にご紹介する。ガラス構造の解析はまだ不明なところが多い分野であるが、新たな強度測定法により得られた新たな知見を紹介する。

ガラスの研究者や技術者が破壊や強度に関連した直後から専門レベルに至るしばらくの期間に必要とされる知識を意識して書いたつもりである。そのため、一部の分野は数式を用いて記載したが、定性的な事項はできるだけ図表や言葉により説明した。

誌面の関係からカットせざるを得ない項目も数多く発生したため、他書でよく書かれている部分については思い切って省略し、当方で行った研究結果を中心に記載した。本書で省略した部分や物足りなく感じたところについては、他の著書や参考文献に直接あたっていただきたい。

本書がガラスやセラミックス研究者、および技術者のお役に立つことができれば、幸いである。本書を発行するにあたり、株式会社 **R&D** 支援センターの亀山 翔氏ならびに守谷慎太郎氏に大変お世話になりました。末筆ながら、感謝の意を表します。

目 次

序文	3
第1章 ガラスの基礎	13
1 はじめに	13
2 板ガラスの概念	13
2.1 ガラスとは?	13
2.2 板ガラスの一般的性質	14
2.3 板ガラスの原料と製造方法	16
2.4 板ガラスの主な商品	18
2.4.1 フロートガラス	18
2.4.2 網（線）入りガラス	19
2.4.3 合わせガラス	19
2.4.4 熱強化ガラス	20
2.4.5 化学強化ガラス	21
3 ガラス物性	22
3.1 SI単位	22
3.2 機械的特性	24
3.2.1 応力-歪曲線（縦弾性係数）	24
3.2.2 硬度	25
3.3 熱的特性	26
3.3.1 熱の移動	26
3.3.2 熱伝導率	27
3.3.3 熱膨張率	29
3.3.4 粘性	30
4 ガラス組成と加成性	31
第2章 ガラス破壊の基礎	35
1 はじめに	35
2 歪と応力	36
3 Griffith flaw	38
4 脆性破壊と延性破壊	39
5 圧縮応力と引張応力	41

6	主応力と垂直応力則	43
7	負荷モードと破壊	45
7.1	曲げ破壊	45
7.2	疲労破壊	45
7.3	遅れ破壊	46
7.4	鋭利な物体による破壊	46
7.5	ヘルツ破壊	47
7.6	熱割れ	47
7.7	熱衝撃破壊	48
7.8	異物混入による破壊	48
8	破壊始点 (Fracture origin)	49
9	応力拡大係数 (Stress intensity factor)	51
10	雰囲気の影響	53
10.1	K_I -V 曲線	53
10.2	水分の影響	54
11	ワイブル解析 (Weibull analysis)	55
11.1	ワイブル解析とは	55
11.2	ワイブル係数の算出	57
12	ガラス商品による破壊の違い	60
12.1	フロートガラスの破壊	60
12.2	網（線）入りガラスの破壊	60
12.3	合わせガラスの破壊	61
12.4	熱強化ガラスの破壊	62
12.5	化学強化ガラスの破壊	62

第3章 ガラス強度試験法

1	はじめに	65
2	3つのレベルと対応商品	66
3	Strength レベル	67
3.1	3点曲げ（1点負荷2点支持）試験法	67
3.2	4点曲げ（2点負荷2点支持）試験法	69
3.3	同心円負荷曲げ法	69
3.4	強度測定時の留意点	70
4	Safety レベル	71
4.1	熱強化ガラスの破砕試験	71
4.2	衝撃試験	72

5	Security レベル	74
5.1	防犯ガラス試験	75
5.2	防弾ガラス試験	75
5.3	台風災害試験	77
5.4	爆波（衝撃波）試験	79
6	新たな強度試験法	82
6.1	反力試験法（Repulsive force method）	82
6.2	Quasi-static 試験法（Quasi-static method）	90

第4章 強化ガラスの製造とその強化メカニズム 98

1	はじめに	98
2	Prince Rupert's drop	98
3	熱強化ガラスの強化メカニズム	99
3.1	過渡熱応力に基づく考え方	100
3.2	熱収縮による考え方	101
3.3	熱収縮の差による考え方	101
3.4	室温近傍の熱収縮に基づく考え方	101
3.5	瞬間凍結理論	102
3.6	パーティモデルによる熱強化メカニズム	103
3.7	熱伝達係数、ビオー数、フーリエ数	106
4	易強化性	107
4.1	易強化性とは	107
4.2	易強化性とガラス組成	108
4.3	ガラス組成の変更に基づく結果	110
5	熱強化ガラスの製造	112
5.1	熱強化ガラスの製造と装置	112
5.2	熱強化ガラスの製造	113
5.3	種々の製造方法	114
5.3.1	浸漬強化法	114
5.3.2	固体接触法	116
5.3.3	水ミストスプレイ法	117
5.3.4	衝撃波併用による空冷法	119
6	化学強化ガラス	122
6.1	化学強化ガラスの製造とその強化メカニズム	122
6.2	化学強化ガラスの問題点と対策	123
6.3	化学強化ガラスの反り対策	123

第5章 熱強化ガラスにおけるクラック伝播と分岐現象	126
1 はじめに	126
2 従来の知見	126
2.1 クラック伝播	126
2.2 クラック分岐	127
2.2.1 限界速度到達後のエネルギー解放説	127
2.2.2 2次的なクラック生成とその合一説	128
2.3 反射波の影響	129
3 高速度撮影と主な観察結果	132
3.1 Cranz-Schardin 型高速度カメラ	133
3.1.1 観察装置および方法	133
3.1.2 主な観察結果	134
3.2 光弾性法	137
3.2.1 観察装置および方法	137
3.2.2 主な観察結果	138
3.3 Caustics 法	140
3.3.1 観察装置および方法	140
3.3.2 主な観察結果	140
3.3.3 動的応力拡大係数	144
3.4 ホログラフィ干渉計法	145
3.4.1 観察装置および方法	145
3.4.2 主な観察結果	146
4 クラック伝播と分岐現象	149
4.1 クラックの連結現象	149
4.2 応力 σ_{CR} の概念	150
4.3 2つのクラック衝突による新たなクラックの生成	152
4.4 二股分岐および枝分かれ分岐の生成と特徴	158
第6章 ガラスの切断	164
1 はじめに	164
2 ガラス切断の基本的な考え方	164
3 ガラス切断液の影響	168

第7章 強度測定から推定するガラス構造	174
1 はじめに	174
2 ガラスに関する従来知見	174
3 Quasi-static 試験結果	176
4 ガラスは固体か液体か	177
おわりに	180
索引	182
著者	188

SAMPLE

板ガラスの破壊、強度、強化

SAMPLE

第1章 ガラスの基礎

1 はじめに

ガラスは構成する組成因子を組み合わせることにより、種々の特性を持たせることができる素晴らしい材料である。そのため、多くのガラス組成系が提案されている。そのガラスの中で、シリカ (SiO_2)、アルカリ金属 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)、ライム (CaO) を主体とするガラスは「ソーダ・ライム・シリカガラス」または単に「ソーダライムガラス」と称され、このソーダ・ライム・シリカガラス組成で板状に成形されたガラスは、一般的に「板ガラス」と呼ばれている。

板ガラスは、①透明性、②不燃性、③耐候性、④耐薬品性、⑤切断性、⑥安価などの長所を持っている。すなわち、透明で、燃えにくく、経年劣化もほとんどなく、薬品にも強く、任意の形状に切断できる。さらに、これらの特徴を有しているにもかかわらず、他の材料と比べて安く製造できる。一方、欠点もある。①脆性破壊、②強度への信頼性、③殺傷性を含めた安全性などがその代表的な問題といえる。

本章では、ガラスの基礎として、

- ①板ガラスの概念（ガラスとは、板ガラスの一般的性質、板ガラスの原料と製造方法、板ガラスの主な商品）
- ②板ガラス物性（SI単位、機械的特性、熱的特性）
- ③ガラス組成と加成性

などを述べる。まずは、ガラス、特に板ガラスとはどのような材料であるのか、理解の一助になればと思っている。

2 板ガラスの概念

2.1 ガラスとは？

ガラスとは、一体どのような材料なのか。一般的には、微視的レベルでは均一な材料といわれているが、現時点の測定技術レベルにおける種々の観察結果から、

- ①結晶物質ではないという「非結晶性」
- ②方向による依存性がほとんどない「均一性」
- ③負荷方向に垂直応力が発生するが、「せん断応力は未発生」

などの大きな特徴が得られている。ガラスが結晶物質ではないという「非結晶性」および方向による依存性がほとんどない「均一性」については、古くからよく知られている。一方、超微視的レベルでは不均一である可能性が指摘されており、一部の数値シミュレーションでは「不均一性を示す」とされた報告も存在する。しかし、ガラスの不均一性

第1章 ガラスの基礎

を示すと思われる前提条件から出発し、そのガラス構造あるいは特性に関する結論が不均一性を示したとする論文もあるので、「不均一性を示す」とされる論文に出会った場合にはその前提条件をよく確認する必要がある。

図1.1はこれまでに延べられてきた一般的な結晶・ガラスの構造イメージ¹⁾を示したものである。図1.1aは結晶もしくは金属、図1.1bはランダムネットワーク説²⁾の考えに基づいたガラス構造である。結晶は規則正しく配置されているのに対し、ガラスは不規則に配置されている。なお、微結晶が集まったところと不規則な集まりの集合体という考え方も提案されているが、基本的にはランダムネットワーク説の概念で説明することになる。ここで明らかなように、両者はほぼ同じ大きさか、どちらかというとな結晶（金属）の方が小さいように見える。ガラスは極端に小さな構造因子の集まりであるという微結晶説も存在するが、現在ではこの観点からの論議は極めて少なくなってきた。ガラスの大きな特徴として、「脆性破壊」があるが、図1.1の概念を利用して説明することができる。この脆性破壊については、第2章の4項で説明する。

図1.2はソーダシリカガラスの構造イメージ³⁾である。こちらのイメージが強い方もおられると思うが、ケイ素と酸素が強く結び付いており、ナトリウムが独立的に配置されているイメージである。このようなイメージもあり、ナトリウムは容易に水に溶け出しやすいと考えられている。

2.2 板ガラスの一般的性質

ガラスの特性といっても、多くの物性が提案され、実際に測定もされている。表1.1に、その代表的な物性を示す。板ガラスの組成は製造メーカーによって異なる上、天然鉱物を多く使うので、そのガラス組成もバラついているため、表1.1の数値は参考値である。

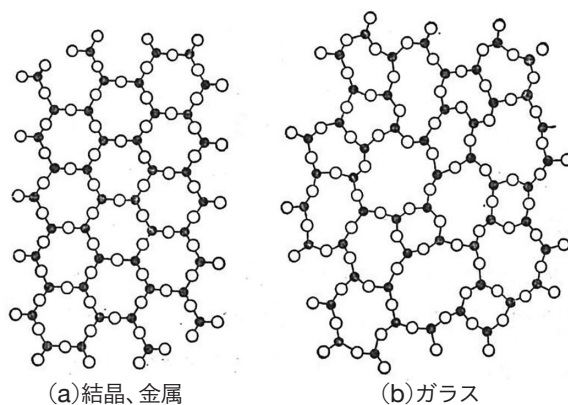


図1.1 結晶とガラスの構造イメージ

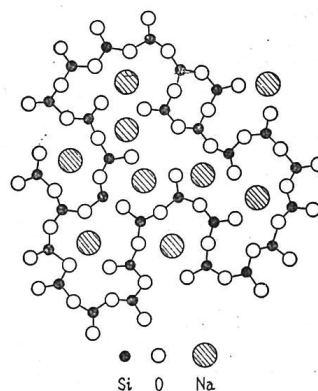


図1.2 シリカガラスの構造イメージ

表1.1 板ガラスの一般的性質⁴⁾

物性	単位	数値	備考
熱(線)膨張率	[/K]	$8.5 \sim 9.0 \times 10^{-6}$	RT ~ 350 °C
熱伝導率	[W/m・K]	1.00	
軟化点	[°C]	720 ~ 730	
比重		約2.5	
モース硬度		約6.5	
ヤング率	[MPa]	7.16×10^4	
ポアソン比	[—]	0.23	
曲げ強度	[MPa]	約49	
屈折率		約1.52	
反射率	[%]	約8	垂直入射、片面;約4[%]
熱容量	[J/kg・K]	837	0 ~ 50 °C

機械的特性は機械物性と表現されることもあるが、ヤング率、ポアソン比、硬度、強度、(粘) 弾性などがその代表例である。これらの物性は本件のテーマである破壊、強度、さらにはクラック伝播に大きく影響する。

熱的特性(熱物性)としては、熱膨張率、熱伝導率、軟化点、比熱、粘性などがその代表例であるが、これらは強化度、特に熱強化ガラスの強化度に大きく影響している。また、熱による破壊現象もあるので、強度に対する直接的な影響も存在することになる。

電気的特性や光学的特性も、ガラスを理解する上で極めて重要である。ガラスに接する雰囲気誘電率がガラスの切断性に大きく影響することは報告した⁵⁾。ガラスの切断については、第6章で述べる。また、屈折率、反射率、透過率などの光学的特性も重要である。

- ①機械物性(機械的特性): ヤング率、ポアソン比、硬度、強度、(粘) 弾性 etc.
⇒強度、破壊、クラック伝播
- ②熱物性(熱的特性): 熱膨張率、熱伝導率、軟化点、比熱、粘性 etc.
⇒強化度、破壊
- ③電気的特性: 電気伝導度、誘電率 etc. 注) 雰囲気誘電率 ⇒切断性に影響
- ④光学的特性: 屈折率、反射率、透過率 etc.

2.3 板ガラスの原料と製造方法

板ガラスの製造は、原料投入、熔融、清澄、成形、徐冷、採板の工程に大きく分けられる。すなわち、板ガラスは、

- ①原料投入（熔融窯：所定のガラス組成に基づく原料を投入）
- ②熔融（熔融窯：一般的には約1,600℃まで加熱）
- ③清澄（熔融窯：ガラスの品質安定性と泡の除去のため、窯の後半で実施）
- ④成形（熔融窯-徐冷炉間：ロールアウト法、フロート法、ダウンドロー法、etc.）
- ⑤徐冷（徐冷炉：粘性領域⇒粘弾性領域⇒弾性領域）破壊防止と除歪が目的
- ⑥採板（ガラス切断）

の工程を経て製造される。板ガラス製造の一例として、ロールアウト法⁶⁾による生産工程の例を図1.3に示す。板ガラスの製造方法としては、フロート法やダウンドロー法その他、デュプレックス法も考えられているが、成形工程を除いておおむね同様の工程をとる。

原料投入は熔融窯の最初の領域で行われ、所定のガラス組成に基づいて調合された原料を使用する。熔融工程も熔融窯の中で行われ、熔融窯の前半で溶融状態になるまで加熱する。清澄工程は、熔融窯の後半で行われ、ガラスの品質安定性と泡の除去を重点的に行う。成形工程では、文字通り、成形して板状にする。熔融窯と徐冷炉の間で行われるが、その成形手段としては、前述したようにいくつかの方法がある。徐冷工程は、徐冷炉の中で行われ、粘性領域から粘弾性領域を経て、弾性領域までガラスの温度は下げられる。最後に、ガラスの欠陥がないことを確認する検査工程を経て、採板工程に送られ、適切な大きさのガラスに切断される。

以下、各工程について、もう少し詳細に述べる。調合工程では、珪砂、石灰石、ドロマイト、ソーダ灰などの原料を適切なガラス組成となるように調合する。化学製品も使うが、原料の多くを天然鉱物資源に頼っているために製造会社により、あるいはその製造時期により、ガラス製品の組成は微妙に異なっている。

調合された原料は、熔融炉の中に入れられ、1,500～1,600℃の高温まで加熱・熔融される。これが熔融工程である。熔融されたガラスは、その中の泡を極力減少させるために清澄ゾーンと呼ばれる領域に送られる。清澄は以下の2つの過程、

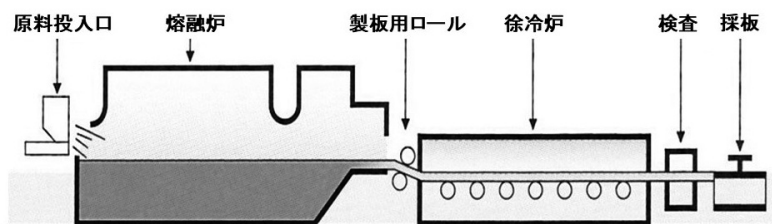


図1.3 ロールアウト法による板ガラスの製造イメージ

- ①気泡が熔融ガラス中を浮上し、表面に達してから破裂し、消滅
- ②残存する気泡中のガラスへの溶解

によって行われる。また、ガラス中では

- ①物理的溶解による泡
- ②化学的溶解による泡
- ③気泡

が存在する。ガラス中の泡を抜くことは簡単ではなく、亜ヒ酸や酸化アンチモンなどの清澄剤を使って対応していた時期もあったが、環境問題に加えて技術力が大きく向上したため、国内において上述の清澄剤を使っているメーカはほとんどなくなっている。

問題のない泡のレベルとなった熔融状態のガラスは、製板工程に送られ、平板状のガラスとなる。板ガラスの製板方法としては、前述したロールアウト法他、ガラスの表面張力を利用してガラスをフラット化させるダウンドロー法やフロート法がある。また、デュープレックス法では簡易なロールで平板化し、徐冷工程後にガラス板の上下面を同時に研削・研磨して製品化する。

平板状に製板されたガラスは、徐冷工程に送られる。この工程では、文字通り「徐冷」すなわちゆっくりと時間をかけて冷却される。十分な徐冷が行われない場合には、ガラス内に歪が残り、思い通りの形状に切断できない問題が発生する。本書の主テーマのひとつである熱強化ガラス（Tempered glass）は、「徐冷」とは全く反対の「急冷」で製造される。このことは、（製造後の）熱強化ガラスが思い通りの形状には切断できないことを意味している。板ガラスを商業生産する場合において、完全にガラス内部の歪を取り除くことは現実的には不可能であり、若干の歪が残っているが、切断の問題がほとんどないレベルまでは徐冷されている。なお、ガラスの冷却は極めて重要で、その冷却速度により板ガラス製品の品質に大きく影響する。

板ガラスは連続的に製造されるので、徐冷工程後は欠陥がないことを確認する検査工程の後、適切な大きさに切断する採板工程に送られる。採板工程後では、すぐに出荷または加工工程に送られることもあるが、一時的に保管され、必要に応じて出荷されるのが一般的といえる。

上述した全ての工程がガラスの強度に影響する。その影響の程度の差はあるが、ガラスの強度には多くの因子が複雑に絡んでいることになる。

近年はフロート法と呼ばれる方法で製造されることが多いため、板ガラスはフロートガラス（Float glass）またはフロート板ガラスと呼ばれることもある。板ガラスを始めとするガラスではその製造方法により、微妙にそのガラス組成は変わる。表1.2にフロートガラスの一般的なガラス組成を示すが、従来の板ガラス組成と大きく異なっていない。多くの割合を占めるシリカ他、ソーダやカルシウムなどが入っている。この表には記載していないが、ガラスカレットと呼ばれる使用済みのガラスを天然鉱物原料と併せて使っているため、板ガラス業界ではかなり前からリサイクルができているということになる。

フロート法はその名前の通り、図1.4に示すように、錫に代表される溶融金属の上に

索引

あ

厚板切断 167

アックス試験 74、75

圧縮応力

21、35、36、40-43、45、61、
62、101、102、104、105、123、
151、180

網入りガラス

19、49、60、61、66、73

新たなクラック生成 126、152、156

アーリーエアブラスト試験 75、79

泡 16、17

合わせガラス

19、20、61、66、73、76、78

い

易強化性 103、107-111、113

1点負荷2点支持法

→ 3点曲げ試験法

イニシャルクラック 164-168、172

異物混入による破壊 45、48

う

薄板切断 166

え

エアノズル 119

鋭利な物体による破壊 45、46

SI単位 13、22-24、106

枝分かれ分岐 134-136、158-161

円形ガラス 129、130

延性破壊 35、39

お

応力拡大係数

25、26、35、44、51-53、139、140

応力緩和

91、92、95、100、101、103、
174、176、177応力 σ_{CR} 150、154、158

応力パターン 21、67

応力場の合成 150、154

応力-歪曲線 24

大たわみ理論 71

遅れ破壊 45、46、91

温度計効果 175

か

化学強化ガラス

18-21、26、62、66、98、122-124

化学強化ガラスの反り 123

影点

140、142、144、152-155、158、
159

加傷性 123

加係数 32、33、108

加式 32、34、109、110

加性 13、31、32、34

過渡熱応力 100、101

ガラスカッター 165-168

ガラス特性温度 31

き

機械的特性 13、15、24

強化初期温度 108-110、113

強度

3、4、13、15、17、19-22、24、
26、29、31-35、38、39、41、

47、49、54-58、60-62、65-68、
73、74、79、82、84-86、88-95、
98、122-124、126、164、165、
174、177、178、180

く

Quasi-static 試験

65、90、92、94、174、176-178

クラック伝播

4、15、24、35、41、43、44、52-
55、62、81、126-129、132-134、
136-138、140、142、144-146、
149、150、156、160

クラックの連結現象 149

クラック分岐

62、127、134-136、140、144

Cranz-Schardin 型高速度カメラ

44、133、134、140、144

グリフィスのキズ → Griffith flaw

クロスニコル 137

け

K_I -V 曲線 53

血管系の分岐 135

限界速度 127、134、146、156

限界速度到達後のエネルギー解放説

127、136

こ

光学的特性 15

合成応力 155、156、158

高速度写真

44、126、128、133、140、142-
144、152、156

光弾性法 44、137、138、143、145

硬度 15、25、26

コースティクス (Caustics) 法

140、142-144、152、156

固体接触法 116-118

さ

最小二乗法 57、58

最大剥離幅 167、169、170

最尤法 58

作用面 36、40、42、43、68

→ 主面

3点曲げ試験法 67、68、70、85、90

3母数ワイブル 56

し

時間遅延型破壊 177

シャープエッジ → スプライン

主応力

21、35、36、40、43、44、52、
62、86、88、126、128、137、
149、150、154、159-161

主面 36、43

瞬間凍結理論 102、103、107

衝撃波

75、79、81、114、119-121、145、
146、148

衝撃波管 (ショックチューブ) 79、119

衝撃波併用による空冷法 119

硝酸カリウム 122、124

ショートガラス 31、105、108、109

ショックチューブ試験 75、79

ショットバッグ試験 65、72、73

徐冷 16-18

徐冷点 31

浸漬強化法 114、116、118

す

垂直応力 13、36、43、51、68

垂直応力則

索引

35、43、44、52、149、172
 垂直歪 36
 ステンドガラス 175
 Strength レベル 4、65–67、82
 スプライン 72、130
 スモールミサイル試験 75、77

せ

脆性破壊 13、14、35、39、67
 Safety レベル
 4、65、66、71、74、75
 Security レベル
 4、19、65、66、74、75
 切断
 4、13、15–17、54、70、112、
 164–170、172
 せん断応力
 13、36、40、42、43、51

そ

双極子モーメント 172
 塑性変形 39、52、139
 反り 18、123、124

た

台風災害 65、74、77
 縦波 145、146、148
 弾性
 3、15、16、29–31、35、36、50、
 99、102、103、126、174、176、
 177
 弾性波 126、129、131、146、148
 断片密度
 71、72、111、113、114、129、130
 端面処理 70、112、116、165

ち

力の伝達 39、40、43

て

転移点 176、178
 電気的特性 15

と

同心円負荷曲げ法 69、70、90
 動的応力拡大係数 140、144
 灯油 168–170、172

に

2次的なクラック生成とその合一説
 128、136
 二段処理法 123、124
 2点負荷2点支持法
 → 4点曲げ試験法
 2母数ワイブル 56、89

ね

熱強化ガラス
 4、15、17、19–21、26、31、
 41、44、46、49、50、53、62、
 66、71、72、98–100、102–104、
 106–109、112–114、116、117、
 119、122、123、126–136、138、
 140、142、143、146、151、155、
 156、158、160

熱収縮 99–102

熱衝撃

45、48、65、82、86、88、89

熱的特性 13、15、26

熱伝達係数

99、101、106、113–116、119

熱伝導 26–28、84、99、106、113

熱伝導方程式 28

熱伝導率

- 15、23、26–29、99、102、106–108、111、113、116
- 熱膨張率
15、29、86、99–102、107、108、111
- 熱割れ 27、45、47、60、84
- 粘性
15、16、24、29–31、61、93、102、103、105、107–111、170、174
- 粘性特性温度 109、110
- 粘弾性
16、29–31、94、99、102、103、174、177、178
- 粘弾性モデル 93–95、177
- は
- パーティモデル 103、108
- 破壊始点
35、38、46–50、60、61、67–70、81、86、129–131、133、134、138、146、148、160、161
- 爆波 65、75、79
- 破碎試験 71
- 破碎数 111、113、130
- 破碎パターン
62、72、129–131、133、134、146
- バタビアの涙
→ Prince Rupert's drop
- パラフィン 168、172
- 反射波 129–131、146、148
- ハンマー試験 74–76
- 反力試験法 65、82、84–86、88–90
- ひ
- ビオー数 106、113
- 微小たわみ理論 70、71
- 歪 17、31、35、36、41、93、100、137
- 歪点 31、108、109
- ビッカース圧痕 25、168
- ビッカース硬度 25、168、170
- 引張応力
21、35、36、38、40–43、45、46、48、60–62、82–84、101–105、107、108、111、116、118、126、128、133、137、146、151、164–167、172、180
- 疲労破壊 45
- ふ
- フーリエ数 106
- 風冷強化法 114、119
- 負荷速度依存性 54、94、95、177
- 負荷モード 35、45、49、60
- 二股分岐 134–136、158–161
- 部分強化ガラス
19、21、44、52、62、136、138、149
- フロートガラス
17、18、26、60、62、66、79、85、86、95、110、122–124、176、178
- 雰囲気の影響 35、53、164
- へ
- ヘアクラック 25、168–170、172
- 平均ランク法 57、58
- ヘルツ破壊 45、47
- ベントクラック 165–167、172
- ほ
- 防火ガラス 19、60
- 防弾ガラス 65、75、77

索引

ホログラフィ干渉計法

119、120、129、145、146

ま

曲げ破壊 41、45

マニュアルアタック試験 74、75

み

水ミストスプレイ法 117

め

メジアンクラック 25、165、172

メジアンランク法 57

も

モース硬度 25

ゆ

UL752規格 76

誘電率 15、170、172

よ

横波 129、145、146、148

4点曲げ試験法 69、70、85、88-90

ら

ラージミサイル試験 75

落球試験 75

り

臨界速度 136

れ

連結現象 149

ろ

ロバート王子の涙

→ Prince Rupert's drop

ロングガラス 31、105

わ

ワイブル解析 35、55、56、57

ワイブル係数 35、56-58、89-91

A

Air cooling method 114

B

Ball test 74

Bifurcation 134-136

Biot number → ビオー数

Branching 135、136

C

Caustics method

→ コースティクス (Caustics) 法

Chemical strengthened glass

→ 化学強化ガラス

Compressive stress → 圧縮応力

Crack divergence → クラック分岐

Crack propagation → クラック伝播

Cranz-Schardin camera

→ Cranz-Schardin 型高速度カメラ

Critical velocity → 臨界速度

D

Dynamic stress intensity factor

→ 動的応力拡大係数

F

Float glass → フロートガラス

Fourier number → フーリエ数

G

Griffith flaw

35、38、47、49、164、165

H

Hair crack → ヘアクラック

Hardness → 硬度

Heat transfer coefficient

→ 熱伝達係数

Herz fracture → ヘルツ破壊

I

Immersing method → 浸漬強化法

ISO TC160 65

L

Laminated glass → 合わせガラス

Long glass → ロングガラス

P

Photo-elastic method → 光弾性法

PMMA 140

Prince Rupert's drop 98

Q

Quasi-static method

→ Quasi-static 試験

R

Repulsive force method

→ 反力試験法

S

Safety 4、65、66、71、74、75

Security 4、19、65、66、74、75

Shock tube

→ 衝撃波管（ショックチューブ）

Shock wave → 衝撃波

Short glass → ショートガラス

Solid contact method

→ 固体接触法

Spline → スプライン

Strength 4、26、65–67、82

Stress intensity factor

→ 応力拡大係数

T

Tempered glass → 熱強化ガラス

Tempering property → 易強化性

Tensile stress → 引張応力

Terminal velocity → 限界速度

Thermal conductivity → 熱伝導率

Thermal expansion coefficient

→ 熱膨張率

Thermal shock test → 熱衝撃

U

UL752 76

W

Weibull analysis → ワイブル解析

Wired glass → 網入りガラス

Z

Zone-tempered glass

→ 部分強化ガラス

著者

あらたに しんいち
荒谷 真一

[経歴]

1975年3月 東北大学工学部応用物理学科卒業
1975年4月 セントラル硝子株式会社入社後、硝子研究所、テクニカルセンター主任
研究員、グラスファイバー製造課長、本社建材営業推進部課長、硝子
研究所基礎セクション長などを経て
2006年6月 知的財産部長
2010年10月 セントラル硝子株式会社定年退職、同社嘱託（～2011/10）
現在 GMS研究所 代表
日本材料強度学会 理事・評議員

[特記]

ISO TC160 SC2 (Security) Japanese Delegate (1994/3～2002/5)
博士（工学）東北大学「熱強化ガラスの薄板化における衝撃波の影響」（1996/2）
帝京大学 非常勤講師（2012/4～2016/3）
東京都立産業技術研究センター エンジニアリングアドバイザー（2013/4～2023/3）
日本学術振興会 先端強度材料 第129委員会委員（2012/4～2024/3）

[主な研究分野]

ガラスの熱強化および化学強化、ガラス強度測定法の開発、フロートガラスのクラック進展、熱強化ガラスのクラック伝播、衝撃波による破壊、ガラス融体の熱伝導率測定、グラスファイバーの生産性向上 etc.