

強化ガラスにおけるクラック伝ば現象

セントラル硝子株式会社 硝子研究所

荒谷 真一

Crack Propagation in Tempered Glass

Shinichi Aratani

Central Glass Co., Ltd., Glass Research Center

1. はじめに

本稿で取り扱う強化ガラスは熱（物理）強化ガラスとも称され、軟化点近傍の温度域から表面を急冷することにより作製される。この強化ガラスは、一般の（徐冷された）ガラスよりも表層の圧縮応力と内層の引張応力が大きい。このため、破壊強度は一般のガラスよりも3~5倍程度大きく、図1に示すように破壊時には細かな断片となる特徴をもっている。図1は直径が1000mmの円形強化ガラスの中心から破壊した場合の破砕パターンであり、強化ガラスはよく知られているように瞬時に破壊する。

強化ガラスは破壊した時にも安全なガラスとして広く世の中で用いられている。強化ガラスの細片化現象は安全性の上で極めて重要であることから、数多くの報告がなされている^{1~6)}。しかし、そのクラック伝ばは高速度現象のため、その解析は容易ではない。本稿では、これまでに研究されてきた強化ガラスのクラック伝ば現象に関する主な知見について述べる。

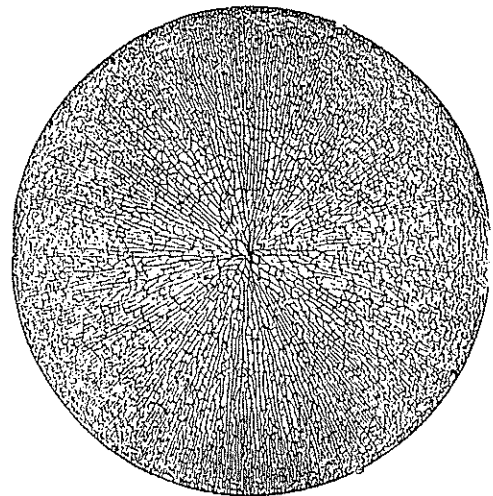


図1 強化ガラスの破砕パターン（直径：1000mm）

2. クラックの伝ば

2.1 クラックの臨界伝ば速度

ガラスのクラック伝ば現象においては臨界速度があるとされ、Schardinのグループがガラス組成依存性に関する実験結果を報告している⁷⁾。表1に示すように、ガラス組成により臨界伝ば速度 (V_F) は大きく変化することが分かる。この結果は有用ではあるが、静的もしくはそれに近い状態で負荷がかかっている場合の

表1 ガラス組成とクラックの臨界伝ば速度の一例 (V_F)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	BaO	Na ₂ O	B ₂ O ₃	PbO	ZnO	Sb ₂ O ₃	TiO ₂	As ₂ O ₃	V_F (m/s)
1	78.7			0.1	12.4		8.0					1400
2	100											2155
3	69.1	2.5			8.2	11.2	0.1	8.8	0.1			1740
4	73.4		0.3	0.6	15.2	10.5						1705
5	44.5	0.7	5.5	27.1		12.9		5.6	0.1	3.4	0.3	1200
6	63.1		10.0	9.7	8.9	6.4	0.8	10.6	0.1		0.4	1345
7	71.1		2.9		15.5	3.3	0.3	6.6			0.3	1500

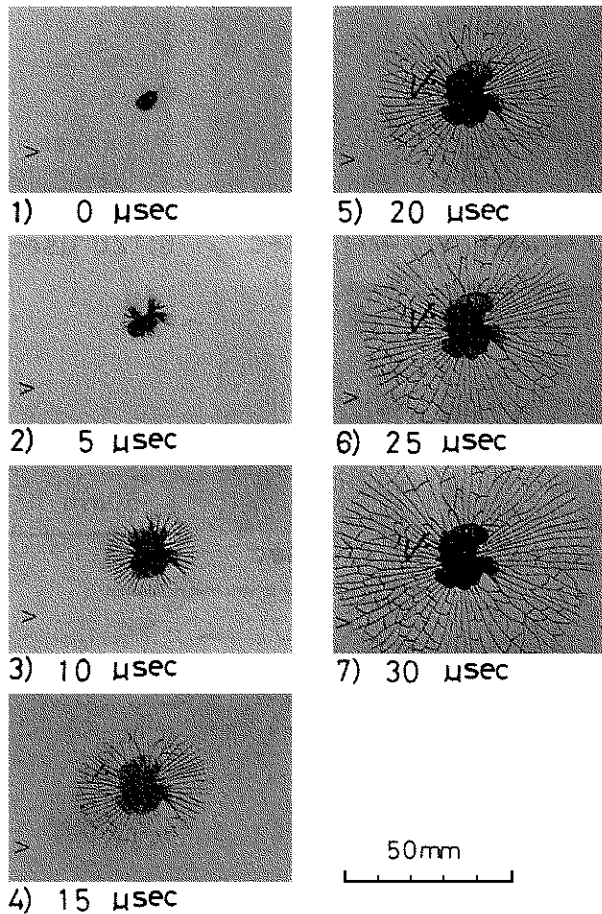


図2 強化ガラスにおけるクラック伝ば (0-30 μ s, $\sigma_s=172$ MPa)

値として認識すべきであろう。実際の動的負荷の下では、臨界速度といわれている値よりも大きな値が報告されている例がある。例えば、Hyodo と Okuda⁸⁾は水中でスパークさせるこ

とにより破壊させたガラスにおいては2400 m/s の V_F が得られたことを報告している。また、徐ら⁹⁾は熱衝撃だけの負荷では1500-1700 m/s であった V_F が、4点曲げと熱衝撃

と組み合わせた負荷により 3000 m/s まで増加したことを報告している。

2.2 強化ガラスでのクラック伝ば速度

強化ガラスの破壊は前述したように瞬時の現象であるが、そのクラック伝ばは高速度カメラを使うことにより観察できる。図2にCranz-Schardin型高速度カメラ¹⁰⁾により撮影された強化ガラス(表面圧縮応力 σ_s : 172 MPa)でのクラック伝ばの一例¹¹⁾を示す。破壊が始まる直前(0 μ s)から30 μ s後までの5 μ s間隔の写真である。10 μ s後には明らかに全ての方向にクラックが伝ばしている。同様にして撮影された95 μ sから130 μ s後までの5 μ s間隔の

写真を図3に示す。伝ばしているクラックの先端をみると、破壊始点を中心とする同心円状になっており、クラックは臨界速度に達していると推察できる。この時の V_F は、 1.500×10^3 m/sであり、一般のフロート板ガラスと同様の値を示した。

強化度を下げた強化ガラスでのクラック伝ば写真の一例を図4および5に示す。これらのガラスは断片密度(破碎断片数/50 mm \times 50 mm)が数個以下であることから、強化ガラス規格のJIS R 3206を満足しておらず、 σ_s も129および123 MPaと小さい。そのため、発生しているクラック数と分岐数は通常の強化ガ

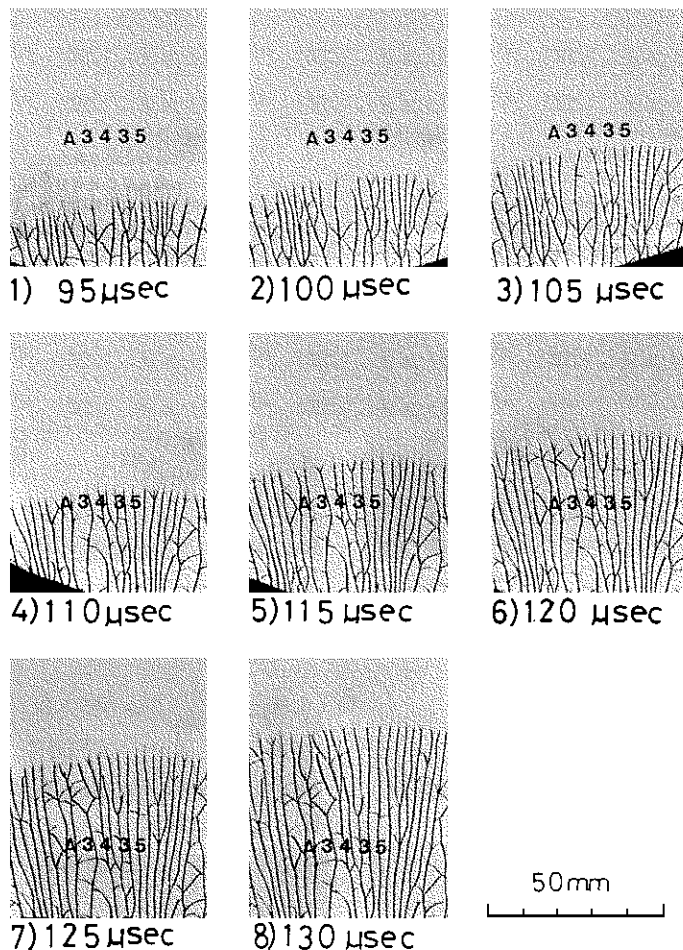


図3 強化ガラスにおけるクラック伝ば (95-130 μ s, σ_s =172 MPa)

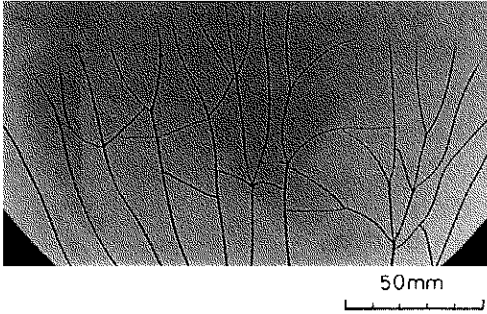


図4 $\sigma_s=129$ MPa ガラスでのクラック伝ば

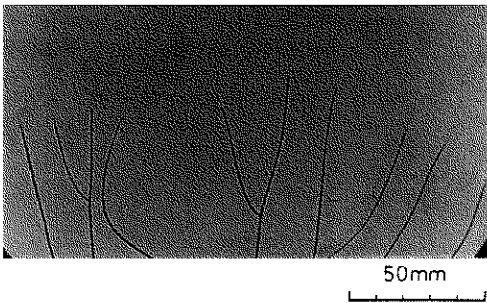


図5 $\sigma_s=123$ MPa ガラスでのクラック伝ば

ラスと比べて極めて少ないが、徐冷されたガラスと比較するとその数は多い。これらの試料におけるクラック伝ば速度はそれぞれ 1.494×10^3 m/s および 1.486×10^3 m/s であった。

図6に V_F と σ_s の関係を示す。図中の○は上述の結果であり、図中の●は後述する部分強化ガラスの結果を示している。本稿で紹介した範囲内では、 V_F と σ_s の間にはほぼ直線的な相関関係があり、 σ_s の値が小さくなると、 V_F の値も小さくなる傾向が認められた。この結果は、これまでガラスの組成によって決まるとされていた臨界伝ば速度が、残留応力もしくは外部負荷の状況によっても変化することを示唆している。

2.3 部分強化ガラスでのクラック伝ば

部分強化ガラスは、破壊時でも視野を確保できる特徴を活かし、かつて自動車のフロントウィンドシールドとして使われた時期がある。

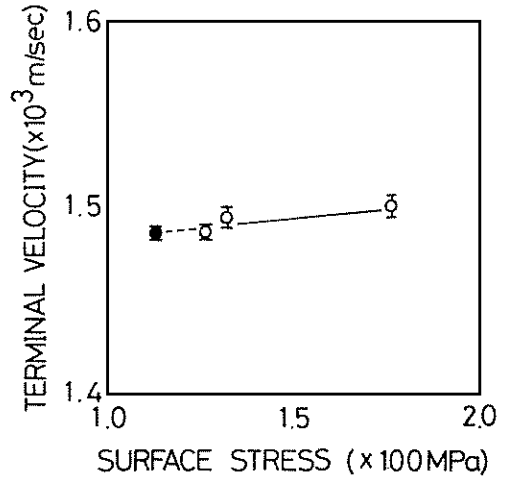


図6 クラック伝ば速度と表面圧縮応力の関係

部分強化ガラスの大部分を占める視野確保領域は、主応力方向と主応力値が異なる2つのゾーンが交互に配置されている。その応力場の変化が通常の強化ガラスに比べて著しいので、クラックの伝ばに対する応力場の影響を検討しやすい。図7にCranz-Schardin 高速度カメラと光弾性法を組み合わせで観察した部分強化ガラスにおけるクラック伝ばの一例¹²⁾を示す。この4枚の写真は $10 \mu\text{s}$ 間隔で撮影されたものである。クラックの伝ばにより残留応力の中立線の位置が大きく変化すること、およびクラック先端の数 mm 先にもクラックの伝ばエネルギーが影響していることなどが分かる。すなわち、クラックの伝ばは強化ガラス内の残留応力の他、クラック自身の伝ばによっても影響される。

さらに、残留応力の影響を受けてクラックが急激に曲がる現象の他、図中の上下から伝ばしていたクラックがそのまま1本のクラックのように連結する現象なども観察された。なお、この部分強化ガラスの σ_s が 112 MPa の領域(クラックが上下に進展している領域)では、 V_F は 1.486×10^3 m/s であった。

2.4 クラック伝ばに対する弾性波の影響

ガラスでのクラック伝ば現象に対しては、弾

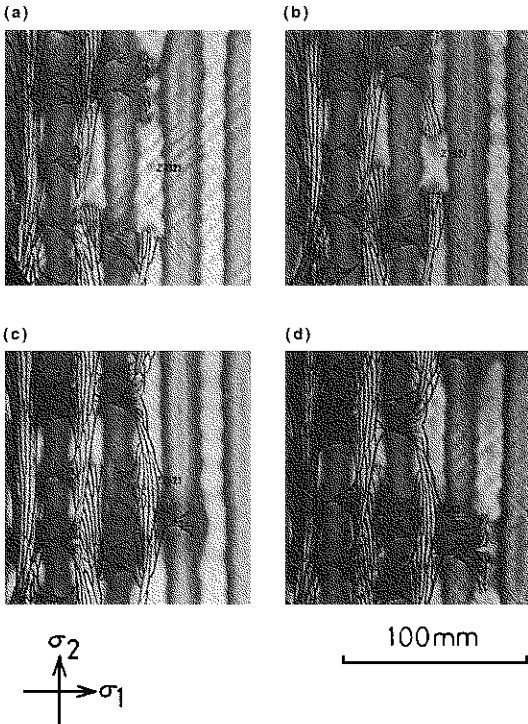


図7 部分強化ガラスでのクラック伝ば

性波，特に反射波（ガラス端部からの反射弾性波）が影響する。図1に示した $\phi 1000$ mmの強化ガラス試料について，その中心から破壊させた場合の断片密度（破砕数/20 mm角）と中心からの距離との関係¹³⁾を図8に示す。断片密度の変化が不連続となる場所（320 mm近傍）が確認され，その位置はクラックと反射波の衝突したところと一致していた。また，スプラインと称される細長い断片の発生が消失する場所もクラックと反射波が衝突した位置に対応していた。

反射波にも種々の波が存在するので，クラックと弾性波の伝ば現象を同時に観察することが重要となる。ホログラフィ干渉計法¹⁴⁾により撮影したクラックと弾性波伝ばの同時観察結果の一例¹⁵⁾を図9および10に示す。図9は，破壊開始後約3, 5, 12, 18, 23および25 μ sの写真である。また，図10は図9(d)の写真（破壊開始後18 μ s）を拡大したものである。なお，

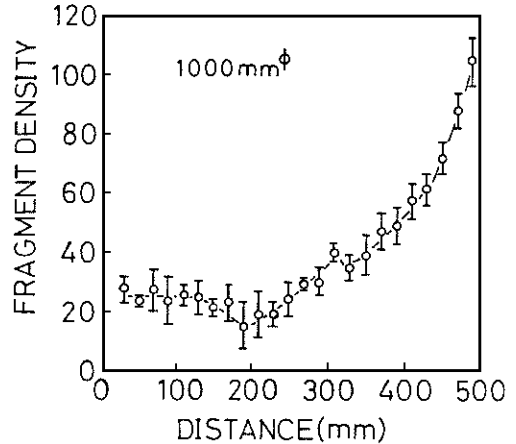


図8 強化ガラス ($\phi 1000$ mm) における断片密度変化

ホログラフィ干渉計法では1試料で1枚の写真しか得られないので(a)~(f)はそれぞれ異なった試料の写真である。クラック以外にも縦波や横波が同時観察されていることが分かる。なお，縦波の伝ば速度は概ね 5.8×10^3 m/s，横波の伝ば速度は 3.3×10^3 m/sであった。

以上の結果から，クラック伝ばに対しては，横波（反射波）の影響が大きく，縦波の影響は極めて小さいと推察された。

3. まとめ

強化ガラスのクラック伝ば現象の概要について述べた。これらをまとめると，次のようになる。

- 1) 強化ガラスのクラック伝ばに対して影響を与えている主な因子は，クラックおよび弾性波（特に反射して戻ってきた横波）の伝ば速度と応力場であり，これらが複雑に関与している。
- 2) 強化ガラスにおけるクラックの伝ば速度は， $1,500 \times 10^3$ m/sであり，通常の（徐冷された）フロートガラスと同様の値である。
- 3) 強化ガラスの強化度を下げると，伝ば

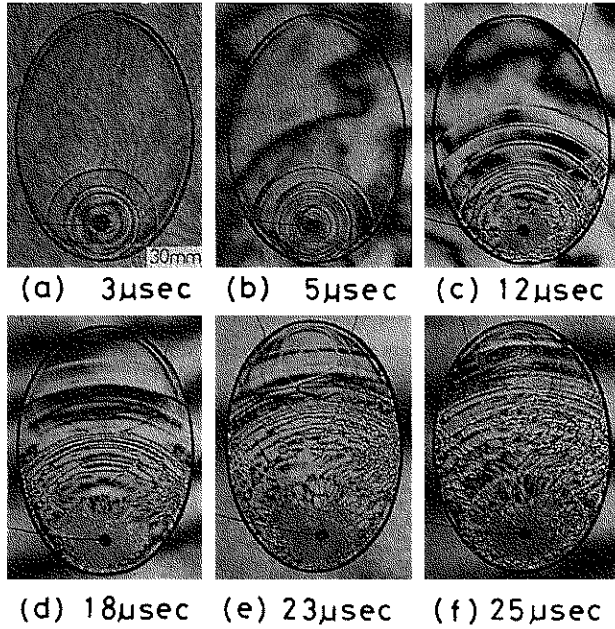


図9 クラックと弾性波の同時観察結果

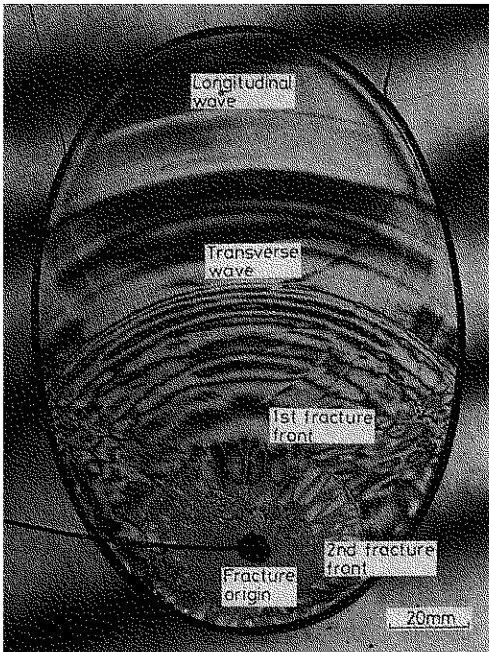


図10 図9(d)の拡大写真

速度も小さくなる傾向が認められる。

クラック伝ば現象は、種々の因子が複雑に絡み合った高速度現象であることから、従来はその解析が難しかった。しかし、現在では測定手法や解析技術の開発が急速に進んでおり、これまで解明できなかった領域についても多くの知見が得られることを期待してする。

参考文献

- 1) K. Akeyoshi, K. Kanai, K. Yamamoto and S. Shima, Rept. Res. Lab., Asahi Glass Co., Ltd., 17, 23-26 (1967).
- 2) J. Barsom, J. Am. Ceram. Soc., 51, 75-78 (1968).
- 3) 高津 学, 池田周嗣, 窯業協会誌, 84, 19-23 (1976).
- 4) 新木信夫, 吉沢英夫, 材料科学, 19, 307-312 (1983).
- 5) 高津 学, 荒谷眞一, 日比野浩, 三嶋康玄, 材料, 33, 1540-1544 (1984).
- 6) 荒谷眞一, 山内 豊, 楠元淳一, 高橋 清, J. Ceram. Soc. Japan, 101, 804-808 (1993).
- 7) H. Schardin, "Fracture", Ed. by B. L.

- Averbach, D. K. Felbeck, G. T. Hahn, D. A. Thomas, MIT Press (1959) pp. 297-330.
- 8) S. Hyodo and F. Okuda, J. Phys. Soc. Japan, 15, 2093-2098 (1960).
- 9) 徐 章, 池田郁雄, 日本機械学会論文集 (A編), 59, 117-123 (1993).
- 10) 高橋 清, 日本航空宇宙学会誌, 29, 447-452 (1981).
- 11) 荒谷眞一, 山内 豊, 高橋 清, J. Ceram. Soc. Japan, 105, 789-794 (1997).
- 12) K. Takahashi, S. Aratani and Y. Yamauchi, J. Mater. Sci. Letters, 11, 15-17 (1992).
- 13) 荒谷眞一, 荻 納淑, 高津 学, 材料, 40, 46-50 (1991).
- 14) K. Takayama, SPIE Conference 398, 174-180 (1981).
- 15) 荒谷眞一, 小島英則, 高山和喜, J. Ceram. Soc. Japan, 100, 1440-1443 (1992).