



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	熱変化によるガラスのひび割れについて（第1報）：ひび割れ速度の測定
Author(s)	吉田, 光徳; Yoshida, Mitsunori; 池田, 郁雄 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 43, 131-155
Issue Date	1967-05-15
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/40821">https://hdl.handle.net/2115/40821</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	43_131-156.pdf



# 熱変化によるガラスのひび割れについて (第1報)

— ひび割れ速度の測定 —

吉田 光徳\*

池田 郁雄\*

(昭和41年11月30日受理)

## On the Cracking of Glass Depending on the Thermal Gradient (I)

— Measurement of Crack Velocity —

Mitsunori YOSHIDA

Ikuo IKEDA

### Abstract

To date, the crack velocity in a glass plate has been measured by various methods, such as using high speed photography, measurement of the destruction velocity of electrodeposition-film on the glass surface, or the schlieren optical method, etc..

In this paper, one of the methods applied for measuring variations of electric resistance on a glass specimen was used. A vacuum evaporation-film coating was given to the glass surface. In this measurement, attempts were made to obtain the elastic constants coming from the destruction of the glass.

In several papers the relation between the variation of the resistance and the destructive sound of glass has been discussed and an assumption has been made in which the crack velocity was given as approximately 1500 m/sec. In this paper as shown in Fig. 9 the maximum crack velocity was assumed to be approximately 1500~2000 m/sec. This value is approximately half value of the cracking sound velocity in glass. It was noted as a point of interest that the cracking velocity was not uniform and it seems to depend on the cracking length.

### 1. 序

ガラスのひび割れの伝播速度とは、ガラスに発生したひび割れの先端の進行する速度であり、その速度とガラスの状態、加えられた応力を与える諸量との間にはすでにいくつかの関係式が求められている。Griffith<sup>1)</sup>は、ガラス自身に先在する微小な割れ目“Griffith flaw”(Fig. 1)が歪を助長し、遂にはガラスを破壊に至らしめる歪を生じさせると考え、flawの面に垂直に引張り応力 $\sigma$ が働いたときに割れ目の成長することによる弾性歪みエネルギーの減少

\* 工業力学第一講座

と、それによって増加する表面エネルギーの釣合いから、ガラスの臨界破壊強度を次の様に算出した。

$$\sigma_c = \left\{ \frac{2E\gamma}{\pi C(1-\nu^2)} \right\}^{1/2}$$

ここに  $E$  はヤング率、 $C$  は Griffith flaw の長さの  $1/2$ 、 $\gamma$  は単位面積あたりの表面エネルギー、 $\nu$  はポアソン比である。これから加えられた応力が破壊の臨界応力  $\sigma_c$  に達したときに存在すべき Griffith flaw は次の様に求められる。

$$C_0 = \frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu^2)\sigma_0^2}$$

薄い板の場合は  $C_0$  は次の様に書ける。

$$C_0 = \frac{2E\gamma}{\pi\sigma_0^2}$$

又、彼はひび割れの先端の半径を  $r$  とすると、その点の受ける許容最大応力  $\sigma_m$  は

$$\sigma_m = 2\sigma \left\{ \frac{C}{r} \right\}^{1/2}$$

で与えられ、ガラスに加えた平均応力  $\sigma$  が  $\sigma_c$  に達しなくても、ひび割れの先端の応力が  $\sigma_m$  になるならば破壊はおこるとしている。これは彼の理論で、破壊は歪みエネルギーがすべて新らしくできる破面の表面エネルギー（彼の理論からは  $4rC$  と与えられている）として費やされるという考えに基づいている。しかし、Mott<sup>2)</sup> は、破壊の進行している途中においてはひび割れの先端付近では絶えず弾性変形が起っているはずであり、当然表面エネルギーのみでなく、弾性変形のための機械的エネルギーとして費やされる分を考える必要があるとし次のエネルギー条件式を提示した。

$$\frac{d}{dC} \left( -\frac{\pi\sigma^2 C^2}{E} + 4rC + \frac{1}{2} K\rho \dot{C}^2 C^2 \frac{\sigma^2}{E^2} \right) = 0$$

ここで  $\dot{C}$  はひび割れの伝播速度、 $\rho$  は試料の密度、 $K$  は定数であり、第一項は弾性歪みのエネルギー、第二項は表面エネルギー、第三項は機械的エネルギーを示している。この式を解くことによりひび割れの伝播速度  $\dot{C}$  は

$$\dot{C} = \sqrt{\frac{2\pi}{K}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left( 1 - \frac{C_0}{C} \right)^{1/2}$$

となり ( $C \gg C_0$ ) ならひび割れの伝播速度は最大となり次式で与えられる。

$$\dot{C}_{\max} = \sqrt{\frac{2\pi}{K}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}。$$

Roberts や Wells<sup>3)</sup> らによると  $(2\pi/K)^{1/2}$  の値は 0.38 と算出されている。又 Yoffe<sup>4)</sup> や Poncelt<sup>5)</sup>

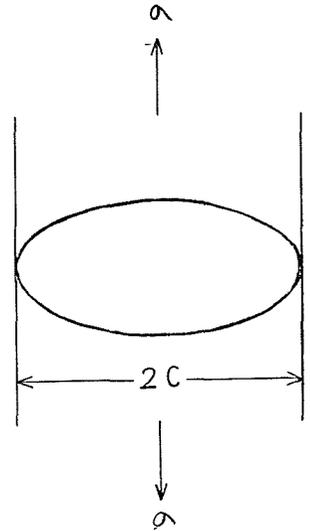


Fig. 1. Griffith flaw.

は、それぞれ異なった方法を用いて (Yoffe; 進行中のひび割れの先端近くの stress と shear wave の関係から, Poncelt; 破壊現象に対する原子模型の立場から) ひび割れの伝播速度の最大値は、物質中を伝播する横波の速度の  $1/2$  であることを示した。

以上二、三述べた理論の実証としては従来は高速度撮影による方法<sup>6)</sup>、塗膜電極の破壊速度の測定による方法、光学的方法、等が行なわれてきているが、本論文は、ガラス面に真空蒸着された蒸着膜の破壊による電気抵抗の変化を測定する方法を用い、同時に、ひび割れの発生時に生ずる音響の観察を併用することにより、この抵抗変化とガラスの破壊音との相互間の関連を求め、その結果からひび割れ速度の算出を試みたものである。

## 2. 実験方法

### 2.1 ひび割れ発生の方法

使用したひび割れの発生の方法は、衝撃による方法、応力による方法、熱変化による方法等であるが、熱変化による方法が用いられた。その理由としては、この方法では破壊されたガラスのひび割れが単純であり (熱勾配の与え方によって大部分の試料を、ただ一本のひび割れ線を得るように破壊することができる)、従ってその抵抗変化波形の解析が容易であるという点からである。その熱源としては、市ガスの燃焼熱 ( $500\sim 800^{\circ}\text{C}$ )、白熱状態のコテ ( $500\sim 800^{\circ}\text{C}$ )、及びアセチレン-酸素の混合ガスの燃焼熱 ( $1500\sim 1800^{\circ}\text{C}$ )、等が用いられたが、アセチレン-酸素の混合ガスの燃焼熱は、瞬間的に熱変化を与えることが可能であり、従って、試料

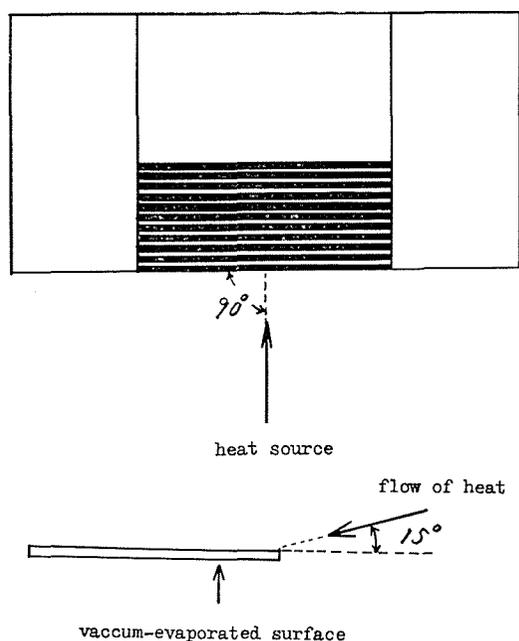


Fig. 2. destruction of glass.

に与える温度勾配も急激にしかも大きく与えることができる。又、熱源の照射角度(方向)によって、ある程度ひび割れの進行方向も決定できるので主にこの熱焼熱が用いられた。破壊時の熱源照射の状態を Fig. 2 に示す。

## 2.2 試料

用いられた試料は、市販のソーダガラス(厚さ約 2 mm)を 50 mm×100 mm の大きさにガラス切りで切断し、超音波を用いて洗滌し、乾燥したものであり、Fig. 3 (a), (b), (c) の如く、その両端には電極として銅 (Cu) を真空蒸着し、中央部には全面 (Fig. 3 (a)), あるいは部分的 (Fig. 3 (b), (c)) にビスマス (Bi) (抵抗率  $120 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  at  $20^\circ\text{C}$ ) を真空蒸着したものである。(蒸着圧;  $2 \sim 3 \times 10^{-5}$  torr, 蒸着膜の厚さ;  $0.3 \sim 2.4 \mu\text{cm}$ )、なお、ガラス端は、ガラス切りで切断したままで Polish, HF 処理, 熱処理, 等は行っていない。

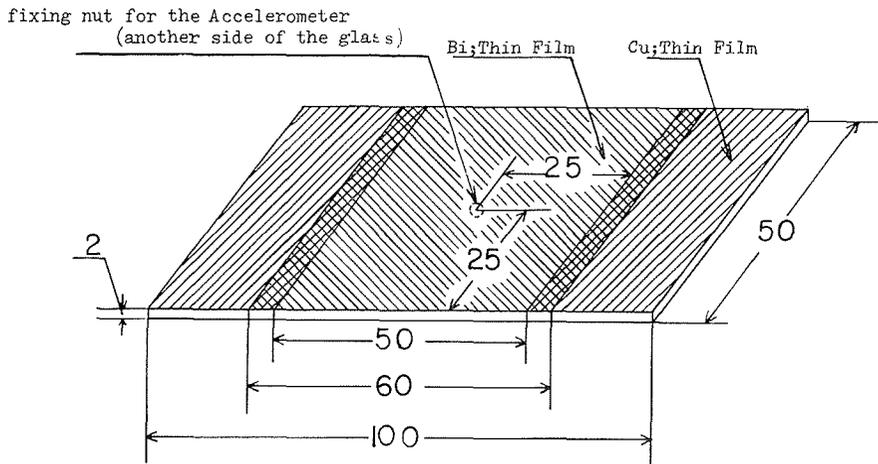


Fig. 3. a Glass specimen (Vacuum-evaporation-film on the whole surface) (unit of measure; mm)

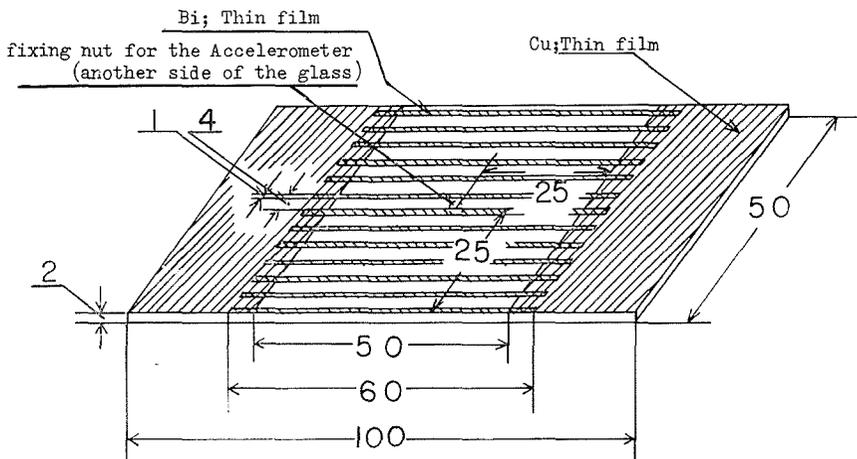


Fig. 3. b Glass specimen (Vacuum-evaporation-film on the parts of surface) (unit of measure; mm)



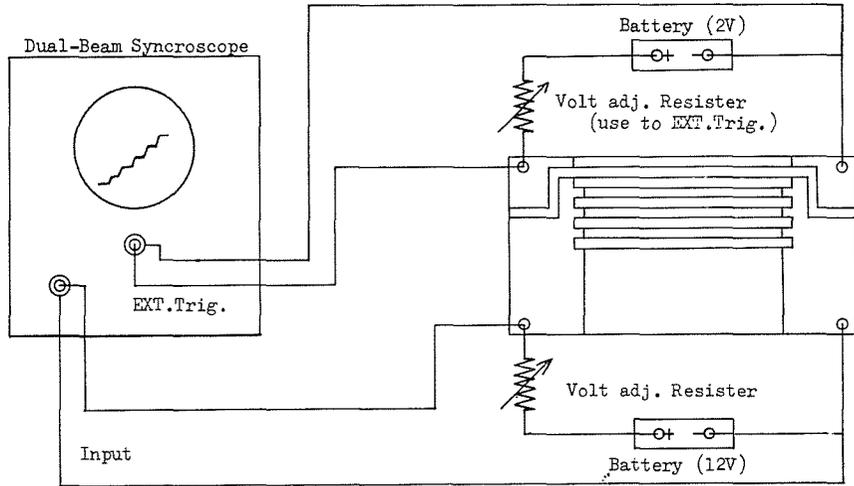
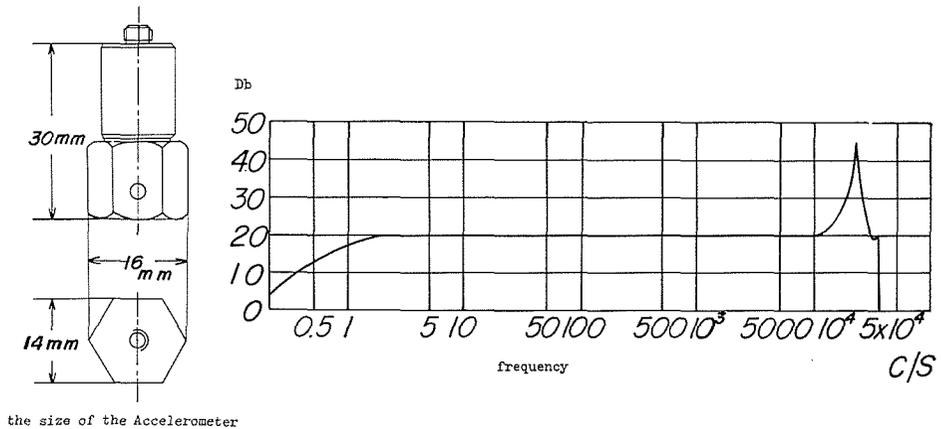


Fig. 4. b Experimental arrangement.



the size of the Accelerometer

Fig. 5. Typical frequency characteristics of the Accelerometer.

く検出器を、試料ガラスの蒸着膜のついていない側に六角ナットを接着剤（ボンド E<sub>3</sub>-硬化剤 C<sub>2</sub> を容積比約 1:1 で混合したもの）で固定して、それに装置することにより得られた。ガラスにひび割れが発生した際に、電気抵抗の変化開始と同時に、シンクロスコープの掃引を開始させ、電圧変化と音響的受信信号とを同時に（Dual-Beam により）得て、その波形により熱応力を加えた状態でのガラス中の音速度を測定した。ここで使用した音響素子は Blüel & Kjær 社の加速度型振動ピックアップで、その構造、及び特性は Fig. 5 のとおりであり、機械～電気トランスデューサーとしてチタン酸バリウムを使用したものである。又、この音響素子を 2 個用いて Fig. 6 の如き測定法を用いて、ひび割れの発生位置の如何を問わず Fig. 7 (a) の受信波形の (イ) と (ロ) の差、及び Fig. 7 (b) の破壊されたガラスの (イ) と (ロ) の差により、熱応力を加えた状態でのガラス中の平均音速度を測定した。

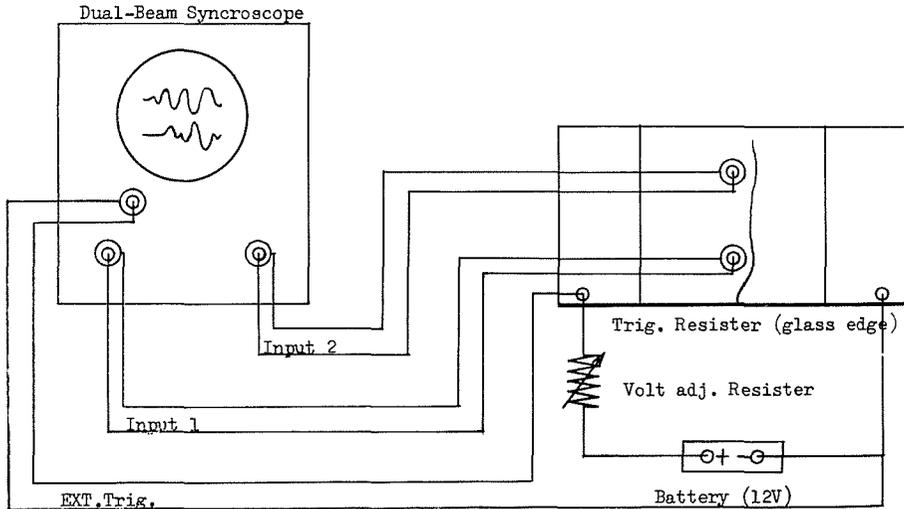


Fig. 6. Experimental arrangement for measurement of the mean velocity in the case, the heat stress is attaching on the glass surface. (two Accelerometers is used.)

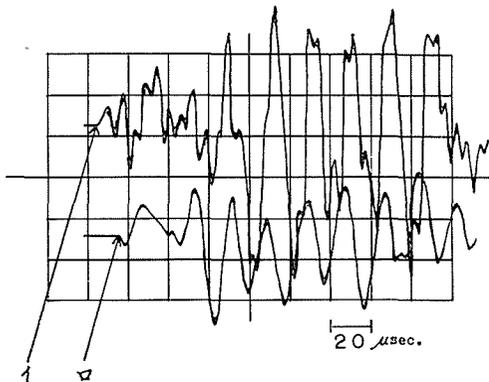


Fig. 7. a Synchroscopic pattern of crack sounds, the case, using the two Accelerometers.

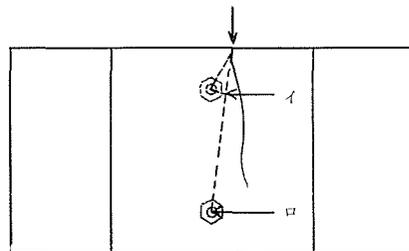


Fig. 7. b Propagation of crack sounds.

## 2.4 測定結果

### 2.4.1 試料中の音速度の測定

熱応力のかからない状態での、試料ガラスのヤング率を光学的方法(加重による変形量の測定)により測定した。その算定式は次に示すとおりである。

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ (m/sec)} \quad E = \frac{Mg}{4abh} \text{ (dyne/cm)} \quad h = \frac{dD_x}{2L} \text{ (cm)}$$

ここで  $v$  はガラス中の音速度,  $E$  はヤング率,  $\rho$  はガラスの密度 ( $=3.5 \text{ gr/cm}^3$ ),  $l$  は支点間隔 ( $=9.850 \text{ cm}$ ),  $M$  は加重 ( $=200 \text{ gr}$ ),  $g$  は重力加速度 ( $=980.0 \text{ gr/cm}^2$ ),  $a$  はガラスの厚さ,  $b$  はガラスの幅,  $h$  はタワミ量,  $d$  は反射鏡支点間隔 ( $=3.00 \text{ cm}$ ),  $D_x$  はスケール移動量,  $L$  は

**Table 1.** Calculation of the sound velocity (Young's modulus of the glass make use of Optical method)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$D_x$	0.2400	0.2833	0.2833	0.2844	0.2522	0.2311	0.2400	0.2888	0.2755
$L$	176.5	177.0	177.0	176.8	177.0	178.5	176.7	177.5	176.8
$a$	0.1800	0.1778	0.1686	0.1697	0.1754	0.1865	0.1794	0.1694	0.1694
$b$	4.935	4.935	5.005	5.000	5.015	5.035	4.945	5.000	5.035
$E$	79.71	70.31	80.49	79.41	80.96	74.91	80.50	78.92	81.92
$v$	4643	4359	4664	4633	4678	4499	4665	4618	4705
No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$D_x$	0.2511	0.3000	0.2199	0.3000	0.2122	0.2745	0.2475	0.2277	0.2475
$L$	176.8	177.0	177.5	177.3	177.5	176.9	177.0	177.5	178.0
$a$	0.1783	0.1605	0.1867	0.1674	0.1747	0.1744	0.1815	0.1844	0.1830
$b$	4.930	5.035	5.040	5.040	5.075	4.990	5.090	5.110	4.950
$E$	78.66	88.47	76.79	78.04	96.49	76.03	72.95	75.56	73.60
$v$	4611	4890	4556	4592	5107	45.33	4440	4519	4460
No.	19	20	21	22	23	24	25		
$D_x$	0.2601	0.2301	0.2718	0.2214	0.2078	0.2854	0.2965		
$L$	176.9	176.5	177.5	177.5	177.3	177.5	177.2		
$a$	0.1736	0.1894	0.1734	0.1860	0.1858	0.1695	0.1717		
$b$	5.016	5.005	4.965	5.020	5.035	5.030	4.965		
$E$	80.68	70.45	78.63	77.95	82.05	79.21	74.19		
$v$	4670	4364	4610	4579	4709	4627	4478		

$$v = 4959 \pm 12 \text{ (m/sec.)}$$

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ (m/sec.)} \quad E = \frac{LMg}{4abh} \text{ (dyne/cm)} \quad h = \frac{dD_x}{2L} \text{ (cm)}$$

$v$ ; sound velocity,  $E$ ; Young's modulus,  $\rho$ ; density of glass,  $l$ : distance of the fulcrum,  $M$ ; load,  $g$ ; acceleration of gravity,  $a$ ; thickness of glass,  $b$ ; wide of glass,  $h$ ; bend of glass,  $d$ ; distance of the fulcrum,  $D_x$ ; quantity of scale movement,  $L$ ; distance to the fulcrum from the scale.

**Table 2.** Calculation of sound velocity, the condition is given the Thermal stress, and using two Accelerometers.

No.	231	233	239	240	242	244	245	247	248	252	253
$x$	2.745	2.632	2.925	2.637	2.594	2.608	2.796	2.743	2.787	2.702	2.829
$t$	6.433	6.965	7.417	7.417	7.255	6.966	7.587	6.342	7.870	6.531	8.260
$v$	4269	3776	3555	3555	3575	4742	3684	4325	3542	4138	3425

$$v = 3796 \pm 83 \text{ (m/sec)}$$

$v$ ; sound velocity in the glass. (m/sec),  $t$ ; distance of the sound transmission time. ( $t$  sec),  $x$ ; distance of the two Accelerometers. (cm)

反射鏡と望遠鏡間隔 ( ) 内は本実験に使用された値である。熱応力のかからない状態での音速度を測定した結果は第1表の如く  $4595 \pm 12$  m/sec. である (本論文では確率誤差を使用する)。又, Fig. 7 (a), (b) のようにガラス面を蒸着しないで, 熱応力を加えた状態で2個の音響素子を用いて測定された音速度は第2表の如く  $3796 \pm 83$  m/sec. である。

#### 2.4.2 ひび割れの進行速度の測定

1) Fig. 8 (a) の波形変化領域 (イ~ロ), 及び Fig. 8 (b) のひび割れ実長 (イ~ロをひび割れにそって測定される長さ) よりひび割れ進行の平均的な速度が求められ, その結果は第3表の如く  $609 \pm 44$  m/sec. である。

2) Fig. 8 (c), (d), (e), (f) の部分蒸着された, 破壊されたガラスの発生信号 (電気抵抗変

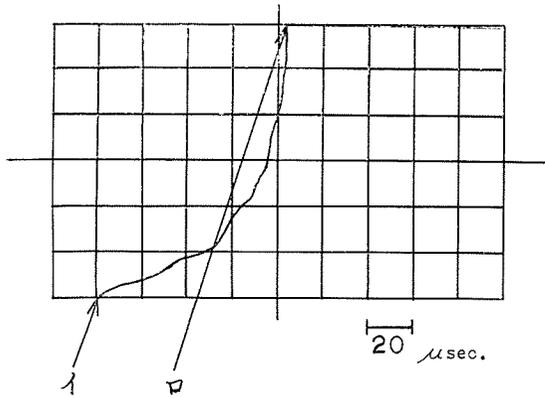


Fig. 8. a Synchrosopic pattern of Voltage variation by the cracking of glass, the case of whole surface evaporation.

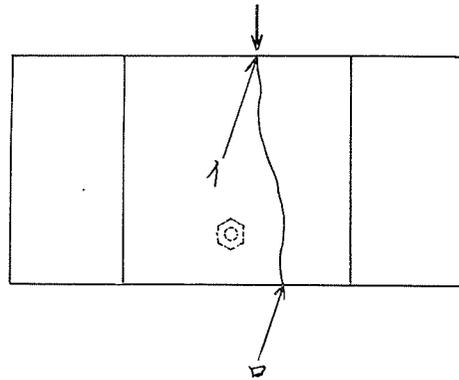


Fig. 8. b Pattern of crack, at measurement of mean cracking velocity of glass. (same case as Fig. 8. a)

Table 3. Calculation of mean velocity of glass cracking velocity in the case of whole surface evaporated.

No.	62	65	60	63	76	77	97	100
$x$	5.166	5.210	5.222	5.129	5.064	5.187	5.074	5.103
$t$	74.69	67.07	66.41	72.60	97.13	77.62	88.73	81.81
$v$	691.6	776.8	786.3	706.4	521.3	681.1	571.8	623.7
No.	101	102	98	105	106	108	109	111
$x$	4.138	4.030	5.131	4.089	4.039	4.064	4.094	4.054
$t$	74.35	74.98	84.53	80.80	77.97	75.11	73.34	72.59
$v$	556.5	537.4	607.0	506.0	518.0	541.0	558.2	558.4

mean value of the mean velocities:  $v_0$

$$v_0 = 609 \pm 14 \text{ (m/sec)}$$

$v$ ; mean velocity of crack's advance velocity. (m/sec),  $t$ ; time of the crack advance. ( $\mu$  sec),

$x$ ; crack length. (cm)

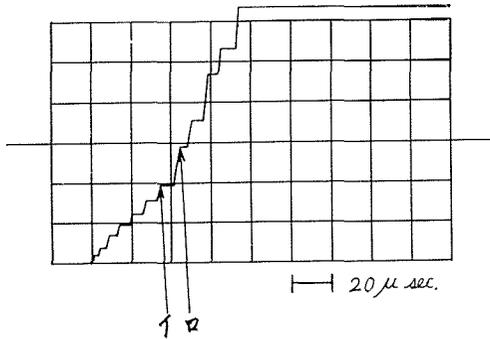


Fig. 8. c Synchroscopic pattern of Voltage variation by the cracking of glass, the case of a part surface evaporation.

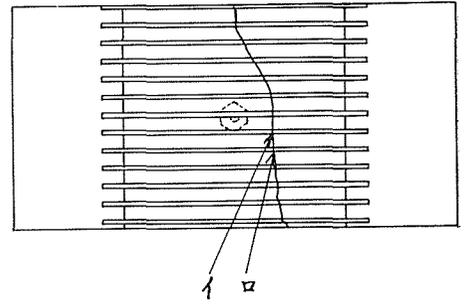


Fig. 8. d Pattern of crack, at measurement of a part cracking velocity of glass. (same case as Fig. 8. c)

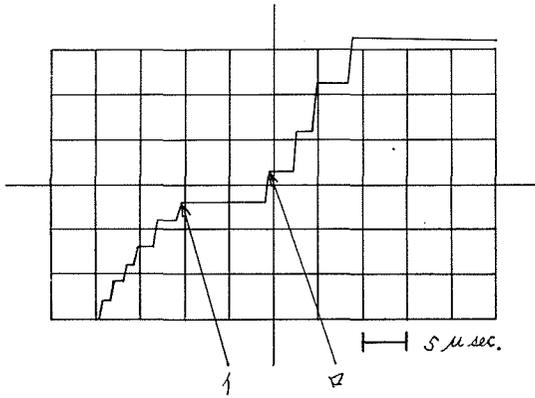


Fig. 8. e (Same case as Fig. 8. c)

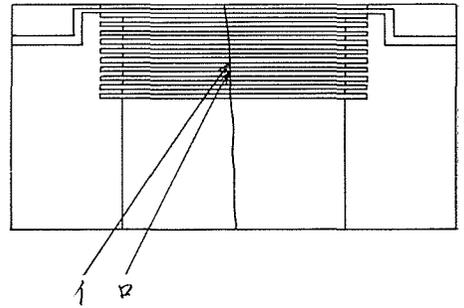


Fig. 8. f (Same case as Fig. 8. d)

化による電極間電圧の変化), 及びその形状により, 部分的ひび割れの進行速度を測定することができ, その算出方法は Fig. 8 (c) の波形に於いて, 時間軸に対して電圧変化の一定な部分から次の電圧変化の一定な部分への移行するまでの間隔 (イ~ロ), 及び Fig. 8 (d) の実際のひび割れ距離 (イ~ロ), 即ち, ビスマスの蒸着されていない部分とそれにつづくビスマスの蒸着されている部分の和 (従って, ひび割れがこの間を進行する間は, 始めは抵抗変化を起さずビスマス帯を進行しているところで, 抵抗変化を起し電圧を上昇させこのビスマス帯を進行し終わった瞬間に再び抵抗変化を示さない部分, 即ち, 波形の一定な部分へでる) により求められ, その結果は第 4 表及び Fig. 9 の如くである。

Table 4-1 Calculation of a part velocity of glass cracking velocity in the case of a part surface evaporated.

No.	A	7.7	11.6	15.7	19.9	24.0	27.7	31.9	35.7	39.9	43.9
1	x			2.90	3.01	2.92	2.92	2.90	2.93	2.80	3.02
	t			11.25	5.233	6.161	8.851	5.427	9.046	3.325	4.548
	v			257.8	575.3	473.9	329.9	534.3	323.9	842.1	664.0
2	x			2.97	3.09	2.83	2.90	2.93	3.03	3.01	3.07
	t			9.629	6.354	8.407	5.817	9.532	4.155	8.016	15.98
	v			308.4	486.3	336.6	307.4	307.4	729.2	375.5	192.1
3	x				2.97	2.87		3.12		3.12	
	t				3.859	4.125		4.023		4.023	
	v				769.6	695.8		713.4		713.4	
4	x	2.92	2.92	2.84	3.01	2.89	2.98	2.89	2.98	3.00	3.20
	t	2.056	2.643	7.587	7.734	7.391	9.154	9.349	5.433	6.168	9.007
	v	1420	1105	374.3	389.2	391.0	325.5	309.1	548.5	486.4	355.3
5	x				2.90	2.88	2.85	2.87	2.94	3.03	2.84
	t				10.27	5.332	6.653	7.680	13.26	4.158	4.109
	v				282.4	540.1	428.4	373.7	221.7	728.7	691.2
6	x			2.87	2.90	2.90	2.88	2.93	2.90	3.10	3.25
	t			4.839	5.719	5.475	7.234	8.114	4.106	5.817	8.847
	v			593.1	507.1	529.7	398.1	361.1	706.3	532.9	367.3
7	x			2.97	2.83	2.97	2.95	2.91	2.96	2.92	2.99
	t			4.363	10.29	4.167	7.500	7.990	5.098	4.853	8.873
	v			731.1	288.6	679.1	369.0	369.2	337.3	580.6	601.7
8	x			3.05	2.94	2.98	3.06	3.02	2.93	3.03	3.44
	t			2.495	19.91	6.066	4.305		5.968	6.751	7.583
	v			1222	147.7	491.3	710.8		491.0	448.8	558.1
9	x			2.76	2.88	3.07	2.93	3.05	2.89	2.95	3.21
	t			4.505	9.794	3.918	4.603	8.227	5.436	6.954	3.918
	v			613.2	294.1	783.6	636.5	370.7	531.6	424.2	832.0
10	x				3.10	2.79	2.96	3.00	3.03	3.12	3.16
	t				13.23	4.606	6.272	9.653	9.310	4.802	10.09
	v				234.3	605.7	471.9	310.8	325.5	649.7	313.2
11	x	2.98	2.78	3.00	3.00	2.86	3.10	2.85	3.11	2.89	3.08
	t	2.012	2.012	10.99	4.809	5.447	7.311	4.662	11.78	4.122	5.545
	v	1481	1481	273.0	623.8	525.1	424.0	611.3	264.0	701.1	555.5
12	x			2.99	2.95	3.09	2.90	3.07	2.91	3.01	3.10
	t			5.447	9.618	3.827	5.152	8.293	4.220	9.618	3.729
	v			548.9	306.7	807.4	562.9	370.2	689.6	313.0	831.3
13	x			2.92	2.82	2.82	2.97	2.97	2.89	3.06	2.85
	t			13.66	3.636	4.177	6.781	6.143	8.649	4.472	3.489
	v			213.8	775.6	675.1	438.0	486.7	334.1	684.3	816.9
14	x	3.02		2.77	2.92	2.84	2.92	2.90	2.87	2.97	2.63
	t	2.504		4.958	5.891	8.443	8.394	4.418	3.584	4.596	17.18
	v	1206		558.7	499.7	336.4	347.9	656.4	8.008	646.2	153.1
15	x	2.93	3.11	2.90	2.97	2.92	2.92	2.96	2.91	3.07	3.05
	t	1.469	2.399	8.713	5.482	6.364	8.960	6.608	7.196	5.433	9.252
	v	1995	1296	332.8	541.8	458.8	329.6	447.9	404.4	565.1	329.7
16	x	3.17	2.98	2.97	2.84	2.95	2.93	2.92	2.88	2.89	2.70
	t	2.359	3.587	9.484	3.882	5.848	8.256	5.209	9.975	3.882	5.749
	v	1344	830.8	313.2	731.6	504.4	354.9	560.6	288.7	744.5	469.6

No.	A	7.7	11.6	15.7	19.9	24.0	27.7	31.9	35.7	39.9	43.9
17	<i>x</i>	2.87	3.49	2.93	3.26	2.86	2.98	2.96	3.01	3.01	3.17
	<i>t</i>	1.667	3.627	10.59	4.314	5.000	6.765	5.343	6.912		6.569
	<i>v</i>	1722	962.2	276.7	755.7	572.0	440.5	554.0	435.5		482.6
18	<i>x</i>	2.96	2.88	2.80	3.06	2.84	3.07	2.88	2.98	3.09	3.08
	<i>t</i>	1.809	3.472	10.81	5.232	6.406	7.335	8.606	4.059	3.374	4.450
	<i>v</i>	1636	829.5	259.0	584.9	443.3	418.5	334.7	734.2	915.8	692.1
19	<i>x</i>						3.04	2.86	3.04	2.85	3.02
	<i>t</i>						7.056	5.341	8.624	4.018	3.283
	<i>v</i>						430.8	535.5	352.5	709.3	919.9
20	<i>x</i>	3.06	2.75	2.95	3.08	2.69	2.93	3.10	3.02	3.11	3.05
	<i>t</i>	2.346	2.444	10.41	3.275	4.106	6.599	6.110	3.422	8.798	3.617
	<i>v</i>	1304	1125	283.4	940.5	655.1	444.0	507.4	882.5	353.5	843.2
21	<i>x</i>		2.80	2.86	3.12	2.94	2.93	2.88	2.92	2.81	3.46
	<i>t</i>		2.644	4.407	13.03	4.652	8.080		8.178	4.407	3.771
	<i>v</i>		1059	649.0	239.4	632.0	362.6		358.1	637.6	917.5
23	<i>x</i>	2.95	2.78	3.02	2.93	2.80	2.97	2.95	3.04	2.84	3.19
	<i>t</i>	1.612	3.175	7.767	3.713	9.819	7.425	9.819	3.664	10.60	
	<i>v</i>	1830	875.6	388.8	789.1	285.2	400.0	300.4	829.7	267.9	
24	<i>x</i>	3.02	2.54	2.95	2.99	2.69	3.01	3.00	3.00	3.05	3.06
	<i>t</i>	2.058	5.880	9.016	3.479	3.969	6.076	6.027	4.263	7.791	3.773
	<i>v</i>	1467	432.0	327.2	859.4	677.8	495.4	497.8	703.7	391.5	811.0
25	<i>x</i>	2.93	2.79	2.94	3.06	2.77	3.00	2.91	3.07	3.10	3.06
	<i>t</i>	1.763	5.093	6.023	6.023	6.121	7.101	8.423	4.162	4.113	12.68
	<i>v</i>	1662	547.8	488.1	508.1	452.5	422.5	345.5	744.1	753.7	241.3
	$\bar{v}$	1552	784.5	346.7	602.2	525.9	403.2	469.5	511.0	634.1	557.1
	$\alpha$	48.8	47.9	22.6	28.0	17.5	7.4	31.8	29.5	24.7	36.1

*x*; distance of crack advance. (mm), *t*; time of the crack advance. ( $\mu$  sec), *v*; a part velocity of crack advance velocity. (m/sec),  $\bar{v}$ ; an average of a part velocity (*v*) (m/sec),  $\alpha$ ; probable error (m/sec), *A*; distance to the crack point from glass edge. (mm)

Table 4-2 (same case as Table 4-1)

No.	A	2.5	6.5	10.5	14.5	18.5	22.5	26.5	30.5	34.5	38.5	42.5	46.5
88	<i>x</i>	2.87	2.92	2.87	2.72	3.07	3.17	2.87	2.77	2.92	3.07		
	<i>t</i>	3.429	2.979	8.402	6.411	6.082	7.400	12.93	9.056	6.081	8.729		
	<i>v</i>	836.7	979.8	341.6	424.3	504.9	428.3	221.9	305.7	480.2	351.6		
89	<i>x</i>	3.45	3.15	3.05	3.10	3.00	3.15	3.25	2.80	3.25			
	<i>t</i>	1.301	4.544	12.42	6.168	7.023	9.401	4.642	5.288	5.827			
	<i>v</i>	2654	693.8	245.5	503.2	427.3	335.1	700.4	529.3	557.4			
90	<i>x</i>	3.35	3.15	2.95	3.10	2.95	3.10	3.20	2.80	3.15	3.30	3.45	
	<i>t</i>	1.862	2.854	9.307	7.014	4.273	6.346	8.315	5.584	6.902	4.820	8.101	
	<i>v</i>	1801	1105	316.8	442.2	690.8	488.1	384.6	501.7	456.5	684.6	425.9	
94	<i>x</i>	3.02	3.02	2.98	2.45	3.07	3.22	3.07	3.12	3.02	3.26		
	<i>t</i>	2.214	3.536	6.408	6.078	6.079	8.182	12.49	10.83	7.512	7.623		
	<i>v</i>	1367	853.1	464.8	402.9	504.9	393.6	245.7	288.0	402.1	427.8		
99	<i>x</i>	2.93	3.31	3.12	2.98	3.07	2.98	3.36	3.31	2.88	3.17		
	<i>t</i>	1.840	4.123	8.464	8.678	4.882	7.600	9.113	7.704	4.991	4.769		
	<i>v</i>	1592	803.3	368.7	343.3	629.0	392.1	368.8	429.8	5.771	664.5		

No.	A	2.5	6.5	10.5	14.5	18.5	22.5	26.5	30.5	34.5	38.5	42.5	46.5
116	x	2.99	3.09	3.18	2.99	3.37	2.99	2.76	3.04	2.95	2.85		
	t	2.214	3.154	5.877	9.656	5.991	9.030	16.92	10.29	9.400	27.93		
	v	1353	980.9	540.8	309.5	562.6	331.1	231.5	295.4	313.8	102.0		
117	x	2.59	2.91	2.82	2.68	2.68	3.01	2.82	3.06	2.68	3.06	2.96	2.73
	t	2.161	2.943	2.579	7.980	6.331	4.690	5.360	9.273	4.068	6.135	7.624	8.449
	v	1199	989.7	109.3	335.8	423.3	641.7	526.1	330.0	658.4	499.1	388.4	323.0
118	x		2.99	3.23	3.04	2.95	2.76	2.95	2.99	2.85	2.90	3.23	2.99
	t		2.211	4.332	11.07	6.386	6.329	4.222	9.478	4.585	6.034	10.71	17.87
	v		1353	745.9	275.6	461.6	436.0	999.0	315.4	622.2	480.9	301.5	167.3
119	x		3.23	2.99	3.28	3.04	3.14	3.14	3.32	3.18	3.18		
	t		2.686	10.04	6.927	7.764	6.523	8.181	5.904	5.048	7.474		
	v		1201	297.8	473.3	391.7	481.5	383.8	562.7	629.7	426.8		
120	x		2.95	2.90	3.14	2.95	3.23	3.14	2.85	3.04	2.95	2.85	
	t		2.597	4.161	9.780	5.411	6.028	3.737	7.900	6.032	6.341	6.138	
	v		1135	697.1	321.0	545.2	535.6	839.5	360.7	504.1	465.2	464.1	
121	x		2.95	3.09	2.90	3.04	2.95	3.28	2.71	3.37	2.85		
	t		2.884	11.43	7.932	7.000	12.05	7.210	7.623	6.491	11.02		
	v		1024	270.3	365.6	434.2	244.8	454.9	355.6	519.2	258.6		
122	x		3.18	3.09	2.95	3.18	2.90	2.99	3.04	2.95	2.71	2.80	
	t		2.073	4.547	11.59	7.452	6.310	10.76	4.555	6.423	5.899	6.112	
	v		1536	679.1	254.5	426.8	459.5	277.8	668.1	459.5	459.3	458.2	
123	x		3.42	2.71	3.09	3.23	3.09	2.80	2.95	2.71	3.04	2.99	3.09
	t		2.350	3.063	10.81	6.022	6.223	4.899	8.062	4.588	7.038	6.017	7.142
	v		1445	889.6	285.8	536.5	496.3	571.4	366.0	590.4	431.8	496.6	432.7
124	x		3.18	3.09	3.14	3.04	2.76	3.09	2.99	3.28	3.28	3.37	
	t		2.233	3.707	12.61	5.623	6.147	4.588	8.478	5.724	5.724	6.040	
	v		1426	832.8	249.0	540.9	448.7	677.6	452.1	573.4	573.4	557.9	
125	x		2.90	2.85	2.95	3.18	2.90	3.18	3.18	3.09			
	t		3.333	10.61	7.641	6.918	7.903	7.228	4.164	660.3			
	v		870.8	268.6	386.1	459.5	367.0	439.8	764.4	468.1			
126	x						3.28	3.18	2.80	3.14	3.14		
	t						6.233	6.032	6.644	7.619	4.791		
	v						526.4	527.3	421.6	412.0	655.5		
127	x		3.19	3.28	3.37	3.23	2.96	3.28	2.76	3.28	2.99		
	t		3.811	8.340	6.227	4.944	5.723	4.891	8.144	4.692	7.001		
	v		837.2	393.2	540.9	653.8	517.4	670.7	339.0	699.3	427.1		
128	x		2.80	3.42	2.95	3.04	3.23	2.95	3.04	3.14			
	t		2.424	6.753	7.162	8.808	6.180	15.40	4.642	9.581			
	v		1157	506.6	412.0	345.0	522.6	191.5	655.1	327.7			
129	x		2.95	3.18	3.28	3.09	2.95	2.95	2.76	3.37			
	t		2.647	11.88	9.890	7.339	17.49	5.466	8.870	6.273			
	v		1113	267.6	331.6	420.9	168.6	540.2	311.1	537.4			
130	x		3.14	2.90	3.04	2.95	2.99	2.95	2.99	3.18	3.33		
	t		2.781	7.463	13.28	8.032	13.28	7.819	5.674	10.55	4.749		
	v		1129	388.7	228.9	367.3	226.0	377.2	527.3	301.4	704.0		
132	x			3.14	2.99	3.28	2.99	2.80	3.04				
	t			13.18	10.45	19.48	8.608	6.981	10.40				
	v			238.2	286.1	168.3	347.2	401.1	292.3				

No.	A	2.5	6.5	10.5	14.5	18.5	22.5	26.5	30.5	34.5	38.5	42.5	46.5
133	<i>x</i>		2.80	2.99	2.95	3.33	2.76	2.95					
	<i>t</i>		3.554	16.07	10.15	19.26	6.390	13.24					
	<i>v</i>		788.7	186.0	290.6	172.8	431.9	222.8					
134	<i>x</i>		3.17	3.12	3.02	3.02	3.17	2.88	2.98	3.12	2.98		
	<i>t</i>		2.282	3.450	13.57	7.844	10.60	18.91	7.840	10.92	12.03		
	<i>v</i>		1390	904.3	222.3	385.2	299.0	152.2	380.1	285.7	247.7		
135	<i>x</i>		2.88	3.46	2.98	2.98	2.98	2.98	2.88	3.36	3.22		
	<i>t</i>		2.703	15.00	7.372	9.223	18.91	5.938	11.40	6.309	7.158		
	<i>v</i>		1067	230.6	404.3	323.2	157.5	501.6	252.6	532.4	449.7		
138	<i>x</i>				3.41	2.98	3.02	3.17	3.17	2.98	2.98		
	<i>t</i>				9.412	9.574	7.752	17.32	6.292	8.482	6.546		
	<i>v</i>				362.3	311.3	389.6	183.0	503.9	351.4	454.9		
	$\bar{v}$	1543	1085	485.4	352.1	445.3	402.6	431.6	421.2	489.7	461.3	441.8	307.7
	$\alpha$	146.7	33.8	34.0	13.0	18.8	15.5	25.8	19.0	16.8	20.9	20.9	51.9

*x*; distance of crack advance. (mm), *t*; time of the crack advance. ( $\mu$  sec), *v*; a part velocity of crack advance velocity. (m/sec),  $\bar{v}$ ; an average of a part velocity (*v*). (m/sec),  $\alpha$ ; probable error. (m/sec), *A*; distance to the crack point from glass edge. (mm)

Table 4-3 (same case as Table 4-1)

No.	A	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.9
19	<i>x</i>	2.18		2.16	1.97						
	<i>t</i>	1.477		1.903	2.726						
	<i>v</i>	1476		1135	722.7						
20	<i>x</i>	1.89		1.55							
	<i>t</i>	1.231		1.278							
	<i>v</i>	1535		1213							
23	<i>x</i>	2.09	2.08								
	<i>t</i>	1.842	1.756								
	<i>v</i>	1135	1184								
24	<i>x</i>	2.13	2.11	2.11	2.18						
	<i>t</i>	1.713	1.259	1.439	3.351						
	<i>v</i>	1243	1676	1466	650.3						
27	<i>x</i>	2.02	19.5	2.06							
	<i>t</i>	1.138	1.210	1.719							
	<i>v</i>	1632	1529	11.93							
28	<i>x</i>	1.95	2.04	2.02							
	<i>t</i>	1.346	1.412	1.583							
	<i>v</i>	1449	1445	1276							
29	<i>x</i>	2.16	2.04	2.02							
	<i>t</i>	1.393	1.308	1.318							
	<i>v</i>	1551	1560	1533							
30	<i>x</i>	1.99	2.46								
	<i>t</i>	1.877	1.668								
	<i>v</i>	1060	1475								
32	<i>x</i>							2.03	2.01	1.96	2.03
	<i>t</i>							3.768	3.578	3.910	3.152
	<i>v</i>							538.7	561.8	501.3	644.0

No.	A	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0
33	x	1.94	2.10	2.06	2.01		2.14	1.79	2.24		
	t	1.208	1.208	1.824	2.676		4.169	3.553	4.050		
	v	1606	1738	1135	751.1		513.3	503.8	553.1		
34	x		2.01	2.06	1.99	2.14	2.01	2.04	1.88	1.99	2.26
	t		1.254	1.491	1.775	3.857	10.67	2.627	2.508	3.313	3.029
	v		1603	1382	1121	554.8	188.3	776.6	749.6	600.7	746.1
35	x	1.89	2.20	1.97	1.96		1.95	2.07	2.24	1.93	2.06
	t	1.277	1.679	1.561	2.105		2.602	3.524	3.784	2.271	3.761
	v	1480	1310	1262	931.1		749.4	587.4	592.0	849.8	547.7
36	x	1.81	1.90	2.09	2.11	2.01	2.17	2.45	2.07	1.58	1.97
	t	1.181	1.417	1.441	1.748	3.425	11.46	3.236	3.236	2.858	2.409
	v	1533	1341	1450	1207	586.9	189.4	757.1	639.7	552.8	817.8
37	x			2.20	2.00	2.35	1.95	2.03	2.10	1.90	1.99
	t			1.654	1.560	3.190	8.648	5.364	2.363	2.103	2.694
	v			1330	1282	736.7	225.5	378.4	888.7	903.5	738.7
38	x			2.01	1.99			1.78	2.14	2.15	2.06
	t			1.278	1.349			12.09	2.887	3.502	3.502
	v			1573	1475			147.2	741.3	613.9	588.2
39	x		1.97	1.99	1.95	2.15	2.04	2.02	1.89	1.97	2.27
	t		1.110	1.441	1.393	1.889	2.740	9.518	2.291	2.456	3.401
	v		1775	1381	1400	1138	744.5	212.2	825.0	802.1	667.5
40	x	1.85	2.20	2.01	1.93	1.86	1.91	2.06	2.25	2.79	2.01
	t	1.001	1.239	1.358	1.620	1.906	4.073	9.123	2.692	2.334	3.168
	v	1848	1779	1480	1191	975.9	468.9	225.8	835.8	1195	634.5
41	x	1.83	1.84	2.10	2.11	2.01	2.21	2.46	2.05	1.48	1.81
	t	1.138	1.280	1.778	2.063	2.798	10.34	3.367	3.414	2.726	2.703
	v	1608	1438	1181	1023	718.4	213.8	730.6	600.5	542.9	669.6
42	x	1.98	1.89	2.97	1.95		1.94	2.02	2.05		
	t	1.162	1.849	1.873	2.892		3.343	4.220	3.272		
	v	1704	1022	1105	674.3		580.3	478.7	626.5		
43	x		2.17	2.04	2.00	1.86	2.04	1.73	2.19	2.98	2.00
	t		1.659	1.611	1.896	3.104	11.61	2.109	3.412	3.507	2.962
	v		1308	1266	1055	599.2	175.7	820.3	641.9	593.1	675.2
44	x		2.04	1.99	1.99	2.13	2.04	2.01	1.90	1.99	2.22
	t		1.428	1.404	1.404	1.784	3.712	9.493	2.617	2.784	3.712
	v		1429	1417	1417	1194	549.6	211.7	726.0	714.8	598.1
45	v	1.96	2.11	2.03	1.95	1.89	1.96	2.06	2.21	1.85	2.02
	t	1.328	1.186	1.352	1.775	2.823	10.72	2.823	2.751	2.941	3.107
	v	1476	1779	1502	1111	669.5	182.8	729.7	803.3	629.0	650.1
46	x	1.72	1.86		2.06	1.96	2.20	2.46	2.03	1.53	1.92
	t	1.115	1.257		1.589	1.684	3.273	9.606	3.060	2.419	3.178
	v	1543	1480		1296	1164	672.2	256.1	663.4	632.5	604.2
48	x		2.07	2.02		1.26	2.25	1.71	2.16	2.13	1.96
	t		1.161	1.564		2.346	11.71	2.393	2.796	3.815	2.820
	v		1783	1292		537.1	192.2	714.6	772.5	558.3	695.7
49	x	2.21	2.03	2.01	1.98		2.05	2.03	1.88	2.00	2.22
	t	1.278	1.444	1.278	1.562		3.267	9.138	2.580	2.178	3.527
	v	1729	1406	1573	1268		627.5	222.1	728.7	918.3	629.4

No.	A	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0
50	x			2.06	1.92	1.89	1.96	2.04	2.21	1.90	1.98
	t			1.372	1.420	1.940	3.029	9.536	3.195	2.556	3.644
	v			1502	1352	974.2	647.1	213.9	691.7	743.3	543.4
51	x	1.82	1.84	2.08	2.07		2.23	2.43		2.00	
	t	1.283	1.212	1.806	2.994		4.610	5.822		2.448	
	v	1419	1518	1152	691.4		483.7	417.4		817.0	
52	x	2.00	1.83	2.15	1.94	2.27	1.96	2.00	2.06	1.93	1.99
	t	1.731	1.328	1.708	2.016	4.578	10.58	3.036	3.937	3.510	5.052
	v	1155	1378	1259	962.3	495.8	185.3	658.8	523.2	549.9	393.9
53	x	2.11	2.21	2.03	2.05	1.84	2.14	1.76	2.13	2.09	1.99
	t	1.206	1.631	1.584	1.702	2.199	3.475	7.612	2.719	3.735	2.790
	v	1750	1355	1282	1205	836.7	615.8	231.2	784.1	559.6	713.3
54	x	2.10	2.00	1.98	1.94	2.19	2.02	2.06	1.81	2.00	2.19
	t	1.205	1.394	1.583	1.536	2.599	4.868	8.128	2.103	2.906	3.946
	v	1743	1435	1251	1263	842.6	415.0	253.4	860.7	688.2	555.0
55	x	1.91	2.21	2.00		1.92	1.98	2.07	2.21	1.83	2.10
	t	1.229	1.394	1.418		2.363	9.546	4.371	2.694	2.741	3.048
	v	1554	1585	1410		812.5	207.4	473.6	820.3	667.6	689.0
56	x		1.81	2.13			2.27	2.42	2.03	1.54	1.71
	t		1.700	2.622			3.614	3.684	3.850	2.244	3.495
	v		1065	812.4			628.1	656.9	527.3	686.3	489.3
57	x		1.93	2.02	1.95	2.30	1.97	2.00	2.11	1.87	2.02
	t		1.396	1.585	1.704	1.964	5.111	2.982	3.478	2.698	2.532
	v		1383	1274	1144	1171	385.4	670.7	606.7	693.1	797.8
58	x		2.13	2.04	2.05	1.83	2.16	1.76	2.14	2.08	1.98
	t		1.840	1.557	1.462	1.627	3.373	8.585	2.500	2.146	2.429
	v		1158	1310	1402	1125	640.4	205.0	856.0	969.2	815.2
59	x		1.95	2.02	1.99	2.13	2.06	1.99	1.90	2.00	2.21
	t		1.566	1.448	1.448	1.780	2.800	9.611	2.183	2.349	7.895
	v		1245	1395	1374	1197	735.7	207.1	870.4	851.4	763.4
60	x	2.07	2.43	2.02		1.93		2.10	2.15	1.86	2.06
	t	1.232	1.706	1.848		2.109		8.294	2.441	2.038	2.867
	v	1680	1424	1093		915.1		253.2	880.8	912.7	718.5
61	x			2.11	2.08	1.97	2.22	2.42	2.07	1.52	1.92
	t			1.518	1.471	1.992	4.696	9.701	2.396	2.751	3.558
	v			1390	1414	989.0	472.7	249.5	863.9	55.5	539.6
62	x	1.97	1.84	2.19	1.94		1.97	2.04	2.06	2.01	2.01
	t	1.113	1.184	1.563	2.037		4.216	3.008	3.884	3.221	4.926
	v	1770	1554	1401	952.4		467.3	678.2	530.4	624.0	408.0
63	x				2.05		2.13	1.70	2.20	2.14	1.99
	t				2.674		8.803	2.319	3.928	3.620	6.389
	v				766.6		242.0	733.1	560.1	591.2	311.5
64	x		1.98	1.94	1.99	2.16	2.02	2.04		2.01	
	t		1.373	1.539	1.444	2.415	5.682	7.126		2.131	
	v		1442	1261	1378	894.4	355.5	286.3		943.2	
65	x			2.03	1.93	1.91	1.93	2.08		1.81	2.00
	t			1.494	1.589	1.613	3.344	9.013		2.182	2.823
	v			1359	1215	1184	577.2	230.8		829.5	708.5

No.	A	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0
66	$x$	1.70	1.85	2.08	2.06	2.02	2.29	2.35	2.10	1.52	1.63
	$t$	1.159	1.159	1.443	1.466	1.916	3.430	8.184	2.176	1.655	2.152
	$v$	1467	1596	1441	1405	1054	667.6	287.1	965.1	918.4	757.4
67	$x$	2.06		2.10	1.96	2.34	1.95	2.07	2.05	1.94	1.99
	$t$	1.207		1.420	1.372	2.130	2.911	9.134	2.579	2.461	3.147
	$v$	1707		1479	1429	1099	669.9	226.6	794.9	788.3	632.3
68	$x$	1.92			1.58	1.33	2.08	1.78	2.17	2.05	2.05
	$t$	1.514			1.491	1.750	3.524	8.917	2.815	2.318	2.909
	$v$	1268			1060	760.0	590.2	199.6	770.9	884.4	687.5
69	$x$	2.12	1.98	1.98			1.99	2.06	1.83	1.96	2.25
	$t$	1.608	1.490	1.372			2.483	5.393	5.369	1.703	2.342
	$v$	1318	1329	1443			801.4	382.0	340.8	1151	960.7
70	$x$	1.96	2.16	2.06	1.92	1.92	1.95	2.05	2.26	1.82	1.96
	$t$	1.278	1.610	1.468	1.728	1.918	4.001	5.185	2.344	2.178	2.983
	$v$	1534	1342	1403	1111	1001	487.4	395.4	964.2	835.6	657.1
	$\bar{v}$	1530	1452	1337	1138	897.2	472.8	426.3	730.0	746.2	639.0
	$\alpha$	24.6	22.5	14.1	30.9	30.1	24.5	24.9	15.2	19.6	13.9

$x$ ; distance of crack advance. (mm),  $t$ ; time of the crack advance. ( $\mu$  sec),  $v$ ; a part velocity of crack advance velocity. (m/sec),  $\bar{v}$ ; an average of a part velocity ( $v$ ) (m/sec),  $\alpha$ ; probable error. (m/sec),  $A$ ; distance to the crack point from glass edge. (mm)

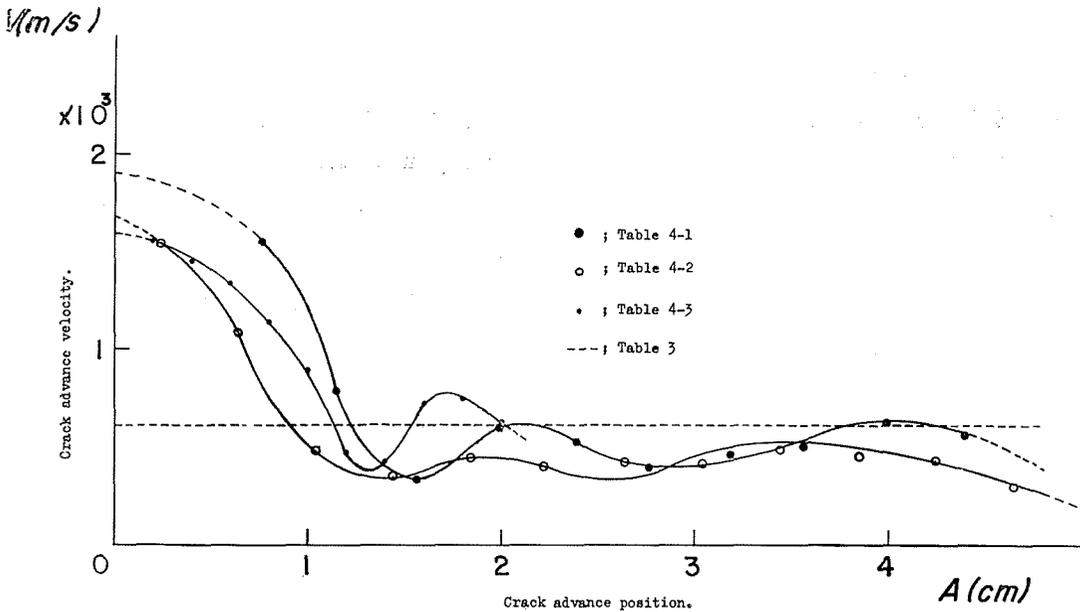


Fig. 9. The velocity of glass cracking at the divided part.

### 3. 考 察

#### 3.1 ひび割れの進行速度について

全面蒸着した試料から得られたものは、ひび割れ進行の平均的な速度のみ算出されているが、この値は用いられる試料の大きさ、形状、又、最初に与えられたエネルギー（熱応力）の大きさ、その種類、等及び、その他の条件により変化するものであるが、本実験の結果は部分蒸着法によって測定された値の平均値とほぼ一致している。部分蒸着法の採用の理由は、第一に蒸着膜のひび割れ進行とガラスのひび割れ進行との間の関連をみるためであったが、部分蒸着法と全面蒸着法との完全に類似した結果は、蒸着膜のひび割れ速度をもってガラスのひび割れ速度を論じてよいことを意味するものである。第二の理由はひび割れ進行の部分的な速度分布を見ることである。Fig. 9 のようにひび割れの進行した位置と、部分的なひび割れの進行速度について、部分的な蒸着膜を持った試料から各部分におけるひび割れの進行速度が算出されているが、このひび割れの進行速度を示す曲線が、そのひび割れの位置に対してなめらかな減衰曲線とはならず、極大、極小をもっている。このことは、ひび割れを生ずる（あるいは進行させる）ために必要なエネルギー（歪みエネルギー）の集中、蓄積、及びその解放が繰返し起っているものと考えられる。又、ひび割れの進行速度の減少する原因として考えられることは、ひび割れ進行の先端（割れ目の先端）において、ひび割れを発生することにより試料に弾性変形を伴い、歪みエネルギーの解放が、破面の表面エネルギーとして費やされるのみではなく、弾性変形のための機械的エネルギーとしても費やされ、その結果熱エネルギーとしての損失も考えられなければならない、又、歪みエネルギーの集中、蓄積の原因として考えられることは最初に試料に与えられた熱応力の大きさ、そのもっているエネルギーの分布状態（温度分布）、試料の形状、試料の始めからもっている歪の分布状態、及び、試料表面の雰囲気（試料を包む媒質の種類、試料表面の状態、即ち、蒸着物、接着物等の有無、表面の処理方法の差異による試料の強度の変化）、等が挙げられる。このように、種々の条件の違いにより部分的なひび割れの進行速度は変化するが、いずれの場合においても、全体としてのひび割れの進行速度曲線が極大、極小をもっている。従ってこのことから、ひび割れの進行は連続的なものではなく、断片的な破壊（微視的な破壊）が起き、その連続により進行するものであるといえる。

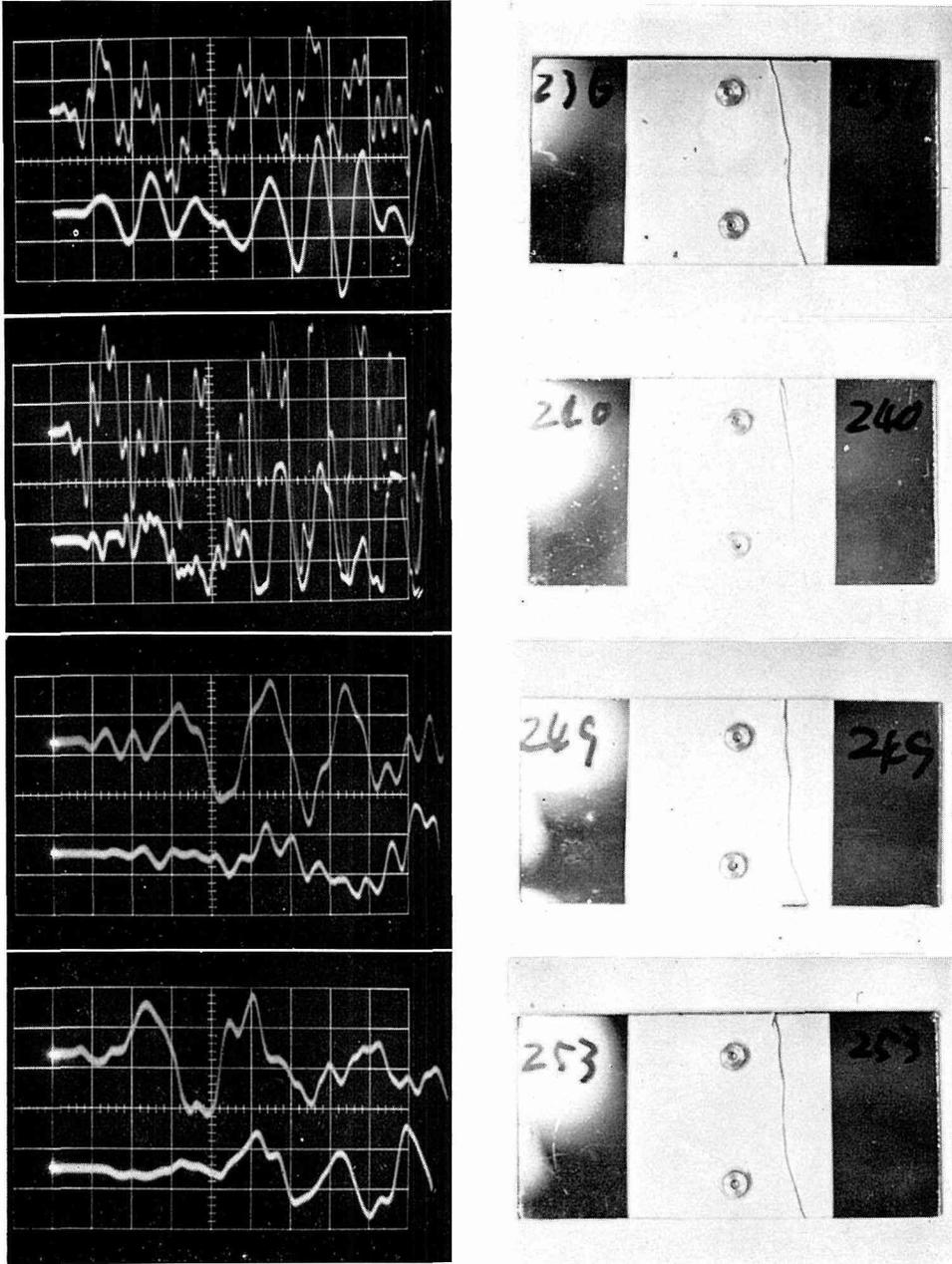
#### 3.2 破壊時における試料中の音速度について

全面、及び部分的に蒸着された試料にたいして、音響素子を1個あるいは2個を用いて熱応力を加えた状態での試料中の音速度の測定が行なわれたが

1) 音響素子を1個用いての測定は、試料ガラスにひび割れが発生し（従ってひび割れ音も発生している）、抵抗変化が開始されてもなお音響受信信号がシンクロスコープのブラウン管上に掃引されず（シンクロスコープは電圧変化に対して0.05 V の変化が起ってから掃引が開始されるようになっている）、従ってひび割れ発生時の音の伝達時間間隔の測定を困難とし、

又、音源 (ひび割れの発生位置) と音響素子の間隔の測定が困難である、従ってこの方法でのデータ算出は行なわれなかった。この方法に対し

2) 音響素子を2個用いての音速度測定は、前述の如く音源の位置には関係せずして、音



**Fig. 10.** Synchronoscopic pattern of cracking sound and crack's form when on the glass plate. (by the use of two Accelerometers.) (time scale;  $20 \mu \text{ sec./cm}$ )

の伝達の時間差，及び音響素子の間隔（いずれも正確に測定できる値である）から測定することができ十分に信頼をおける値である，この結果は前に述べられたとおりである。

### 3・3 破壊模様

2個の音響素子を用いて，熱応力を加えた状態での音速度測定の際の音響波形，及び破壊

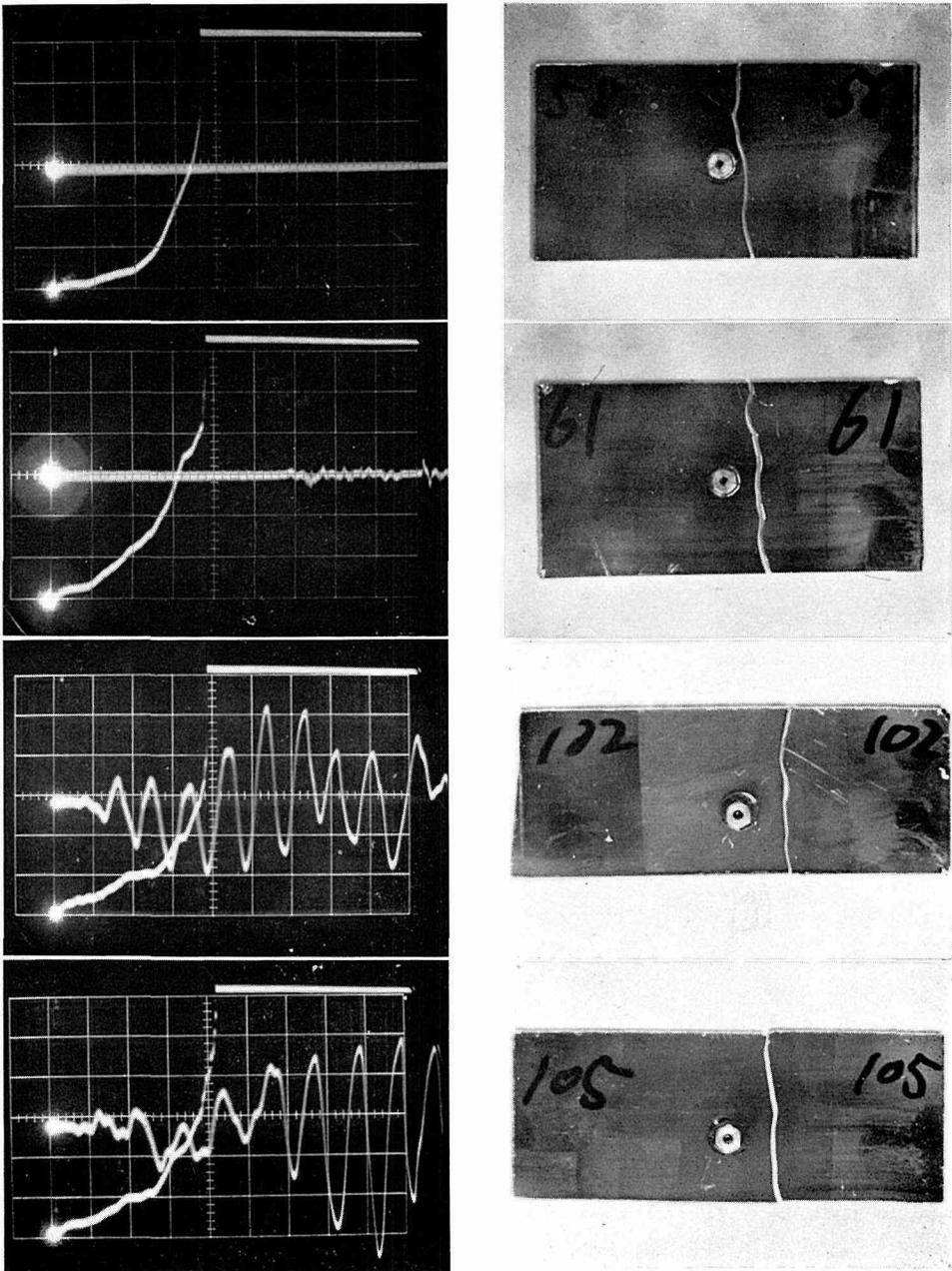


Fig. 11. Synchronoscopic pattern of voltage variation and crack's form, the case of whole surface evaporation. (time scale  $20 \mu$  sec./cm)

されたガラスの様子は Fig. 10 にみるとおりである。この音速度測定の精度向上は、波形の掃引時間を短かくすること、及び破壊を、2個の音響素子を結んだ線上で発生させることにより可能である。又、Fig. 11 の全面蒸着されたガラスの破壊による抵抗変化の信号波形を Fig. 12 のような、ガラスに全面蒸着された抵抗膜を切断する際の抵抗変化の図と比較すると明らかなように、ガラスのひび割れが、一様にしかも連続的なものであるならば Fig. 12 と同様な変化を示すはずである、しかし実際の変化は Fig. 11 の如くでありこの波形は、ひび割れの進行が実験結果に示されたように、その速度は一様でなく微視的な破壊のつながりであることを示すものである。又 Fig. 11 のガラスの破壊模様を図において音響素子の固定用ナットの近くで、ひび割れの進行方向の変化していることが観測されるが、これはこの音響素子固定用ナットを接着したことにより被破壊ガラスの歪の分布が変化したことによる影響の現われであると思われる。又、抵抗体を蒸着したことによりガラスの表面の状態が変化することによってこのひび割れの進行に影響を与えるものと考えられる。このことは Fig. 13 (a), (b) の様に部分蒸着された破壊されたガラスの様態において、蒸着膜の境でひび割れの進行方向の変化が認められる。又、Fig. 13 (a) の信号波形の図においても、音響素子の固定用ナットの接着された近くでのひび割れの進行に要する時間の延長が認められる。この様なことから試料ガラスの表面の状態がひび割れの伝播速度に影響を与えることがわかる。従って又、ガラスの表面エネルギーはひび割れの発生にも大きな影響を与えていることが推定される。

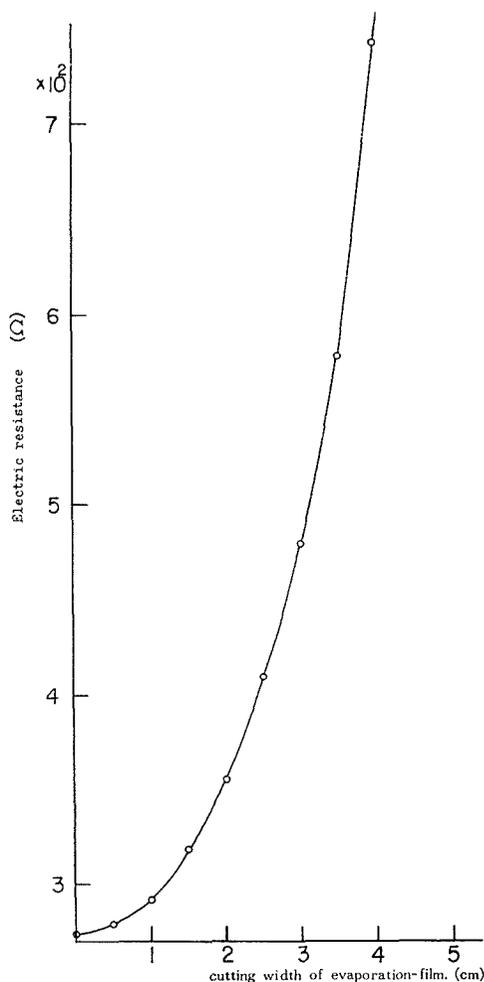


Fig. 12. The variation of the electric resistance by the means of cutting the Vacuum-evaporated the Vacuum-evaporated-film.

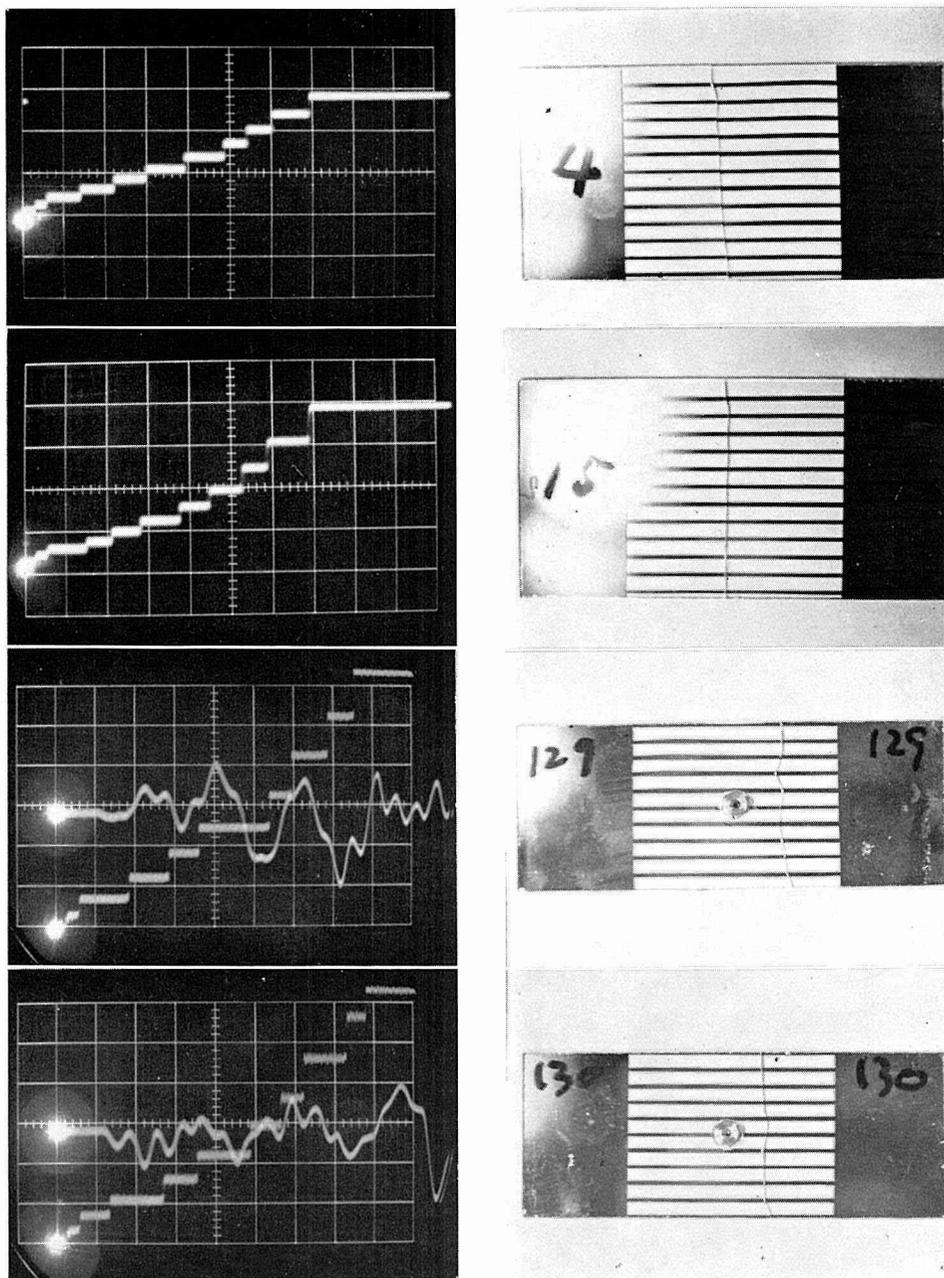


Fig. 13. a Synchronoscopic pattern of voltage variation and crack's form, the case of a part surface evaporation. (time scale  $20 \mu \text{ sec./cm}$ )

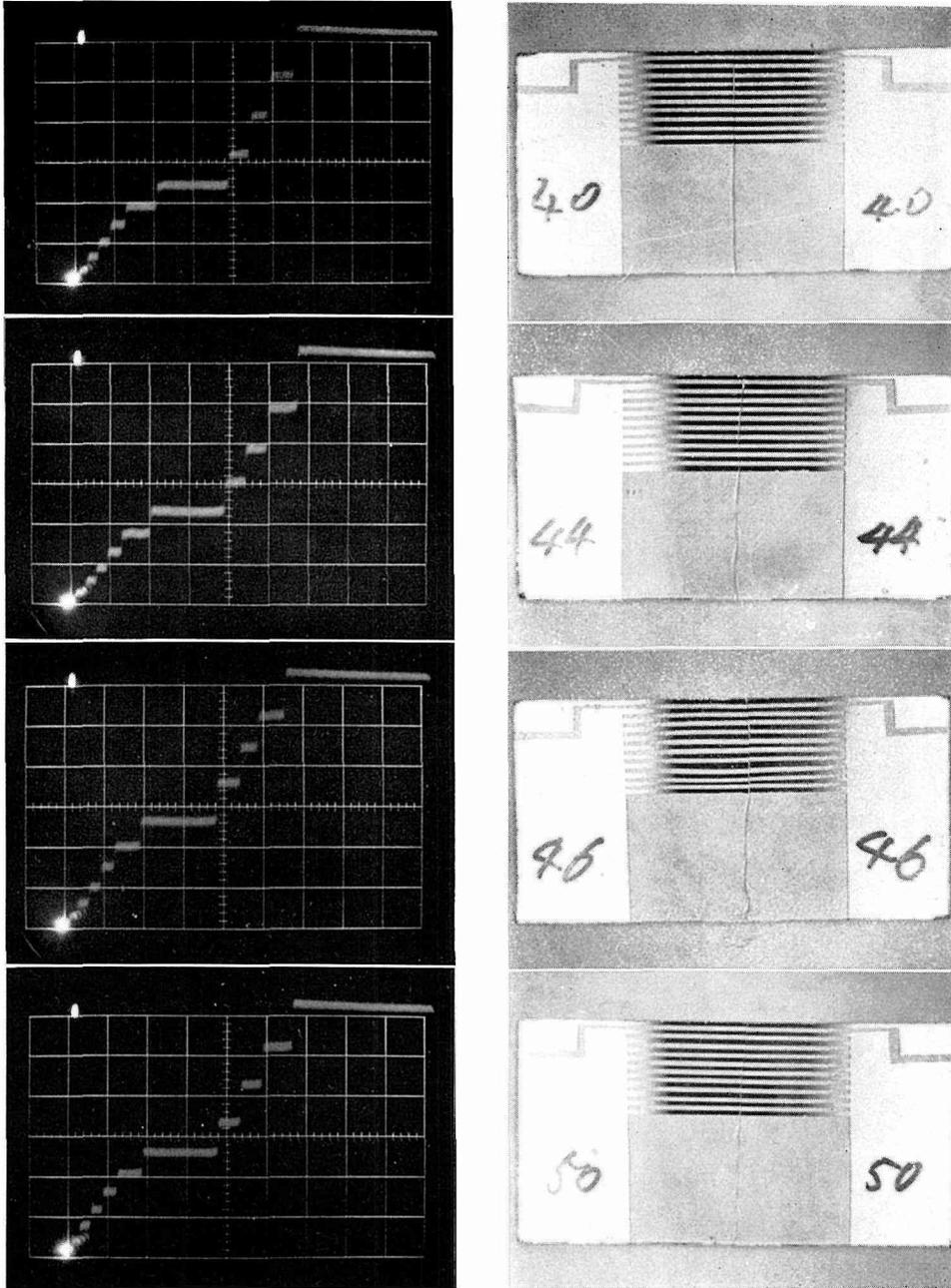


Fig. 13. b (Same case as Fig. 13. a) (time scale;  $5 \mu$  sec./cm)

#### 4. 結 論

以上の考察の結果により部分的に蒸着されたガラスの破壊により平板ガラスのひび割れが Fig. 9 のような速度で進行し、その速度は試料の各部分により異なっており、ひび割れ速度として単に平均速度を考慮することは不完全である。我々の実験結果はひび割れ進行中の物質の弾性諸定数に変化のあることを示している。従ってひび割れ速度の微細な測定はひび割れに関する現象の究明に重要な役割を果すものと思われる。従って Fig. 9 のように得られた速度分布曲線の解析は、ひび割れの現象の究明に重要な手掛りを与えるものと考えられる。又、熱応力を加えた場合の破壊では、ガラスのクラックは、与えられた熱源によって試料ガラスが受ける温度勾配のゆるやかな方へ進行するといえる（破壊の応力は（温度）勾配の急な方へ働いているはずである）。平板ガラスの破壊に於いては、ひび割れの進行の初期の段階に於いてその速度が早く、ひび割れ発生後約 1 cm 位から徐々に遅くなってゆくという過程をとっている。従って、ひび割れの進行は、最初に起ったひび割れのエネルギーの伝播、集中、蓄積、解放の繰返しにより引き続き起され、進行するものであり、そのエネルギーの減少によりひび割れの進行速度の減衰をみていると考えている。従って、平板ガラスにおけるひび割れの伝播速度の最大値は、Fig. 9 において、ガラスに最初にひび割れの発生した位置（同図でひび割れの進行位置 0 cm のところ）におけるひび割れ進行速度がその値を示すと考えられる。先の実験においては、部分蒸着膜を作成する時に使用されるマスクの作成技術の不十分さからこのひび割れ発生位置付近での測定例が少なく、明確な値が算出されていなかったが、その後マスクの作成法の改良により Fig. 3 (c) のような試料を作ることに成功し、Fig. 4 (b) のような測定回路を用いることによって第 4・3 表のような結果を得たこと、及び破壊模様、信号波形は Fig. 13 (b) に挙げられたとおりに今迄の実験を確認できた。これらの結果によりひび割れ速度の最大値は 1500~2000 m/sec. の値であると思われる。よって、部分蒸着法によってガラスのひび割れ速度を測定する場合には、最初にひび割れの発生する位置付近を測定することにより測定可能である。従ってこのためには、ひび割れの発生をできるだけガラス端から起させるようにすべきであり、又、抵抗変化をシンクロスコープで観察する際にもできるだけ、最初にひび割れの発生する付近での変化をとらえるように工夫されなければならない。これをなすためには、最初にクラックの発生すると思われる位置付近にできるだけ多くの部分蒸着膜を作り（平板ガラスの場合のひび割れの発生位置はほぼガラス端に発生させることが可能である。従って Fig. 9 でもわかるように、部分蒸着膜はガラス端から約 1 cm の間に多くの蒸着膜を作成する）、その部分を測定すること、及び、その抵抗の切断による電極間電圧の変化を最初の変化ほど大きくするように工夫することによりさらに精度の向上ができる。今後の課題として

- 1) Fig. 9 の速度分布曲線の解析。
- 2) 部分蒸着膜作成の方法の改良（ひび割れの発生位置付近について、マスクの作成）。

- 3) ひび割れ発生の方法, 技術, 及び装置の改良。
- 4) 試料に与えられた熱応力の分布状態の測定 (破壊時の応力状態)。
- 5) ひび割れ時間, ひび割れ実長の測定精度の向上。
- 6) 実験結果による Mott, Yoffe, Poncelt らの理論の修正。

等があるが, これらについてはなお研究中である。

#### Reference

- 1) A. A. Griffith: Phil. Trans. Roy. Soc.; A 221, 163 (1921).
- 2) N. F. Mott: Engineering, 165, 16 (1948).
- 3) D. K. Roberts & A. A. Wells: Engineering, 178, 820 (1951).
- 4) E. H. Yoffe: Phil. Mag., 42, 739 (1951).
- 5) E. F. Poncelt: Proc. the Engineering Foundation Research Conference on Comminution (1963).
- 6) 兵藤申一: 応用物理, 29-8, 544 (昭和35年8月).