

功している。

しかし音源の表面が一様な速度と位相で振動する完全なピストン音源は存しないのであって、音源面上に速度分布がある場合の音場の問題、逆に希望する音場分布を与えて、これと合致する音場が得られるような音源を見出す問題、さらにピストン音源に対して、(1)式が常に適用できるものであろうかという Rayleigh の式の限界に関する問題など、まだまだ問題はつきないようである。

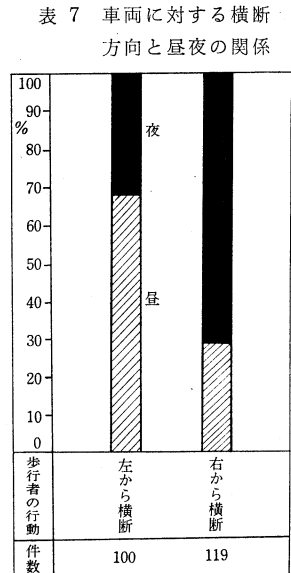
(1968年12月 6 日受理)

参 考 文 献

- 1) Lord Rayleigh, *Theory of Sound* (Dover Publ. New York, 1945), vol. II, p. 107.
- 2) H. Backhaus, Ann. Physik, **5**, 1, 1930.
- 3) L.V. King, Can. J. Research **11**, 135, 1934.
- 4) A. Sommerfeld, Electromagnetische Schwingungen Abschn. V in Frank-von Mises: *Differentialgleichungen der Physik*, Bd. II, 1935.

研 究 速 報

(p.32 よりつづく)



注) 横断については自動車の進行方向に対して左、右とした。

歩道 5%) が、歩行者事故の 20% をしめるということに注目すべきである。表 7 は、直進自動車と横断歩行者との出合頭事故を出合方向別、昼夜別に示したものである。なお、横断については自動車の進行方向に対して、左、右とした。表 7 によると、左から横断の事故 100 件、右から横断の事故 119 件と、あまり差はないが昼夜別にみると、左から横断の事故の約 70% は昼に、右から横断の事故の約 70% は夜に、それぞれ生じている。これについては、夜間の対向車による眩惑、街路照明の配光、歩行者存在の遮へい物、横断者の心理など、多くの要素が関係していると考えられる。

7. 人の行動と歩道の有無の関係

表 8 は、人の行動を歩道の有無によって分類したものである。表 8 から歩道のある道路と歩道のない道路とでは、前者が 183 件、後者が 143 件で、歩道のある道路で生じた事故の方が多いことが知られる。しかし、歩行者

- 5) A. O. Williams, J. Acoust. Soc. Am. **23**, 1, 1951.
- 6) H. Stenzel, *Leitfaden zur Berechnung von Schallvorgängen* (Verlag, Julius Springer, Berlin, 1939), s. 67 ff.
- 7) G. N. Watson, *Theory of Bessel Functions* (Cambridge, 1922) p. 366.
- 8) 根岸, 鳥飼, 生産研究, **5**, 246, 1953.
- 9) Y. Torikai, K. Negishi, J. Phys. Soc. Japan **10**, 1110, 1955.
- 10) 鳥飼, 根岸, 日本音響学会誌, **13**, 117, 1957.
- 11) 鳥飼, 生産研究, **8**, 410, 1956.
- 12) 鳥飼, 超音波音源付近の音場, 超音波研究専門委員会資料 (1957-4-2)
- 13) 鳥飼, 日本音響学会誌, **14**, 36, 1958.
- 14) A. Schoch, Akust. Z. **6**, 318, 1941.
- 15) M. E. Hufford, H. T. Davis, Phys. Rev. **33**, 589, 1929.
- 16) 鳥飼, 生産研究, **15**, 421, 1963.
- 17) 鳥飼, 生産研究, **16**, 19, 1964.
- 18) 鳥飼, 超音波の近距離音場と遠距離音場, 超音波研究専門委員会資料 (1960-9-6)
- 19) 鳥飼, 近距離音場, 超音波技術便覧 (改訂新版) (実吉, 菊池, 能本監修), (日刊工業新聞社, 1966) p. 1399.
- 20) E. Lommel, Abh. der K. Bayer. Akad. der Wissen. **15**, 233, 1886.

表 8 人の行動と歩道の有無の関係

	歩車道区分の有無					
	歩道あり		歩道なし		合 計	
人の行動	件	%	件	%	件	%
対 面 進 行 中	1	0	10	7	11	3
背 面 進 行 中	3	1	19	13	22	7
交差点横断歩道横断中	43	23	5	3	48	15
交差点横断歩道外横断中	52	28	23	16	75	23
単路横断歩道横断中	11	6	7	5	18	5
単路横断歩道外横断中	43	23	24	17	67	20
路上遊戯・作業中	2	1	10	7	12	4
路上とび出し	14	8	25	18	39	12
そ の 他 (注)	11	6	13	9	19	6
不 明	8	4	7	5	15	5
合 計	183	100	143	100	326	100

(注) その他: 道路上に寝ていた, 座っていた, 倒れていた, など静止していたものである

の行動別にみると対面および背面進行中, 路上遊戯・作業中, 路上とび出しについては, それぞれ歩道のない道路で生じた事故の方が多く, これらの事故を合計すると歩道あり 20 件, 歩道なし 64 件で約 1 対 3 になっている。結局, 普通の横断事故と対面・背面進行中, 路上遊戯・作業中, 路上とび出しなど普通の横断以外の事故とを比較すると, 歩道ありの場合約 7 対 1, 歩道なしの場合約 1 対 1 であり, とび出しなどの事故は歩道のない道路に特徴的であるといえる。

8. おわりに

今回までに名車種における事故の特徴, ならびに全事故の概要について述べたが, 次回は今回のいくつかの特徴的な事故についてさらに詳細な解析結果を報告したい。

(1968 年 11 月 21 日受理)

UDC 539.4.015.2: 666.11.017

ガラスの強度

Strength of Glass.

今 岡 稔*・長谷川 洋*

Minoru IMAOKA and Hiroshi HASEGAWA

われやすいものの代表のようにいわれているガラスは、実は決して弱い材料ではなくガラス繊維になると鉄に負けない強さを示す。ではなぜ普通の窓ガラスやコップなどは弱いのか。それについては、ガラス表面にできる小さなクラックが原因だ。と考えられているが、まだはっきりわからない点が多い。しかしそうした表面の欠陥を取除いてやれば、確かにガラスは強くなるし、強いガラスが作られる可能性もありうる。

ま え が き

戦後プラスチックがめざましい進出をみせた当時、ガラスは遠からずプラスチックに取ってかわられるのではないかと考えた人も少なくなかったと思う。しかしその後プラスチックはますます量産されて安くなり、その用途はいよいよ広く実生活のすみずみにまで及んだ感があるが、当初の予想と反してガラスの方もいたって健在で、いわば共存共栄の道を歩んでいるといえよう。ガラスがプラスチックに敗けるのではないかと考えた人たちは、“ガラスはわれやすい”ということ強く感じていたのであろう。たしかにプラスチックは透明でわれにくい材料で、ガラスの最大の欠点を取除いたわけであるが、一方ではかたさや圧縮、引張りに対する強さ、耐熱性や耐久性など、他の面でガラスに劣る点も多々あり結局多くの部分でガラスに取ってかわることができなかった。むしろプラスチックの出現によってガラスの本質が見直されてきたのではなからうか。しかし、いずれにしても“ガラスがわれやすい”という事実は本質的に変わったわけではなく、ガラス屋にとってこの問題は今後も大きな課題であることは間違いない。

“われないガラス”を作るということは、いうまでもなく古くからの課題であり、したがってまた多くの試みと努力が払われてきたことにいうまでもない。その結果として、現在“強化ガラス”が作られ、広く使われていることは周知のことと思う。この強化ガラスは、ガラスの表面に圧縮層を作りだすことにより、表面をかたくし曲げに対して引張りの力に弱いというガラスの欠点をカバーする効果で、ガラスをわれにくくしている。いま広く使われている方法は風冷強化法で、軟化温度付近まで加熱したガラスに空気を吹きつけて急冷する。こうして作られた強化ガラスは普通のガラスの引張り強さの 4 倍程度に強くなり、新幹線の列車の窓ガラスや自動車のフロントガラス、また最近は、一部コップなどにも使われている。一方こうした物理強化と呼ばれる強化ガラスの作り方に対し、最近化学強化といわれる新しい強化法が開発されて注目を集めている。これはガラス表面に圧縮層を作るのに、表面だけイオン交換させて大きなイオン

を押込むとか、表面に結晶化層を作らせるなどの方法によるもので、発表されているところによると 10 倍からそれ以上にも達している。

ところで、近頃のガラスの新しい用途として注目されているものに、強化プラスチック (FRP=Fiber Glass Reinforced Plastic) がある。これは名前のとおりプラスチックの機械的な弱さを補強して強くしようとするもので、その補強材料としてガラス繊維が使われている。こうした強化プラスチックはモーターボートから次第に大きな船に、さらには自動車のボディなど用途を広めつつあり、次第に鉄にとってかわろうとしつつあるといえそうである。さて、これまで“われやすい”ガラス、弱いガラスであったものが、ここでは逆に強いガラスとして登場してきている。また互いにライバルはずであったガラスとプラスチックが、ここでは完全に一体となって協力しているのもおもしろい。いずれにしてもガラスのこのような転身ぶりは板ガラスとガラス繊維の強さを比較してみると容易に理解されよう。すなわち板ガラスの場合引張り強さは 5 kg/mm² からせいぜい 10 kg/mm² であるのに、ガラス繊維の場合はその太さにもよるが、10~15 μ 付近で 100 kg/mm² 以上の引張り強さがある。これは板ガラスの 10 倍から 20 倍の強さで、これまでの強化ガラスよりもはるかに強い。それに細い繊維状のガラスは柔軟性もあり、板ガラスなどのガラスロックとはまったく違った性格をみせる。そこでガラスの強度ということを考えてみる必要がある。なぜ板ガラスはわれやすく弱いのか。ガラス繊維はなぜ強いのか。それも細いものほど強いが、一体ガラスの本質的な強さはどの程度のものか、等々である。

1. ガラスの理論強度

そこで、まずガラスを形成している化合物の化学結合の強さを基礎にガラスの強度を理論的に求めて、ガラスの強さの限界、本質を知っておこう。Náray-Szabo と Ladik¹⁾ が SiO₂ ガラスについてこうした計算をしている。すなわち Si-O の結合の強さと単位面積当たりの結合の数を計算して 2470 kg/mm² という値を出している。これは確かに構造的にも理想的なものについての理論値といえようが、実際の材料についての理論値ということ

* 東京大学生産技術研究所 第 4 部

になると、一般にそのもののヤング率を基準にしている。もっとも粗いエスティメーションとしては、弾性変形の限界を 20% と仮定して理論強度をヤング率の 2 割とする、みかたもある。しかし破壊の過程でなされた仕事と新しく生じた破断面の表面エネルギーが等しいとしてもう少しいい計算を Orowan が行なっている²⁾。それによると引張り強度 σ は

$$\sigma = \sqrt{E \cdot \alpha / a_0} \quad (1)$$

で与えられる。なお E はヤング率、 α は表面張力、 a_0 は原子間距離である。これらヤング率から求めた理論強度は、 SiO_2 ガラスの場合 $0.2 E$ とすると 1460 kg/mm^2 、(1)式から求めると 1000 kg/mm^2 となり、Náray-Szabo らの計算値の半分程度になる。

ところでこうした理論強度の計算にも多くの問題が残っている。Náray-Szabo の計算においても、Si-O 結合の強さのエスティメーションにも問題はあろうが、それを一般的なガラスに適用する場合を考えると単位面積当たりの結合の数から強度を求めることに疑問がある。たとえば B_2O_3 ガラスの強度は、B-O 結合の強さが Si-O 結合と大差ないと考えると、原子価の違いを考えて SiO_2 ガラスの引張り強度の 3/4 程度になるはずである。しかし B_2O_3 ガラスの強度は非常に小さく、また、弾性率も 1740 kg/mm^2 と SiO_2 ガラスの 1/4 以下である³⁾。この理由として次のことが考えられる。シリカガラスでは、Si-O 結合が 3 次元的に連結していて切れ目がないが、 B_2O_3 は元来 3 配位の B による層状構造で、層と層の間の結合はきわめて弱い。ガラス状の B_2O_3 の構造は明瞭ではないが、3 次元的広がりの中でそうした結合の弱い部分が残っていることは間違いない。引張りの強さを考える場合、そうした弱いところから切れてゆく、という考えが当然出てくるし、また B_2O_3 ガラスの弱さの原因もそこにあると思われる。したがって理論強度は単純に単位面積当たりの結合の数や、それらの結合の強さの単なる平均値というものでは出ていない。むしろ弱い結合とその分布の方を問題にすべきであるが、この取扱いは、非常にむずかしいことである。

一方ヤング率も全体的な量であり一種の平均値的なものであるが、応力に対する実際の変形率であるから、弱い結合の実際の分布はそこに含まれていよう。ただそうした平均値的ヤング率の値の 20% が、果してその中の弱い結合の弾性変形の限界の応力とどう結びつくか、きわめて疑問である。また Orowan の提

案した(1)式については、まず固体の表面張力 α の正確な値が得にくいということのほか、原子間距離 a_0 としてなにをとるかも上述の場合と同様に問題になる。以上のようなことで、ガラスの理論強度について十分なものを得たとはとうていいえないが、以下の話を進めていく上でなにがしかの目安を与えるものであることはたしかであろう。

2. Griffith クラック

板ガラスについて(1)式から理論強度を概計してみると、 $E=7 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\alpha=3 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}$ 、 $a_0=2 \times 10^{-8} \text{ cm}$ とすると $\sigma=1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、すなわち、約 1000 kg/mm^2 という値になる。これを前述の実際の板ガラスの強度と比較してみると、100~200 倍の大きな数字になる。逆にいって、本来非常に大きな強度をもっているガラスが、実際のガラス製品となるとなぜこんなに弱くなるのか、また同じガラスでも板ガラスは弱くガラス繊維は強いのか、ということである。こうした疑問に対して答えたのが Griffith の理論⁴⁾である。すなわち彼はこの理論と実際の強度の大きな差を説明するため、ガラスの表面に微細なキズが分布していて、そこに応力集中が起こって破壊が促進されると考え、いわゆる Griffith クラックの存在を仮定した。またガラスの強度についてサイズ効果が大きいことが知られている。板ガラスとガラス繊維の強度の差もそうであり、同じガラス繊維でも試料の直径が細くなるほど、また長さが短くなるほど強度の測定値は大きくなる(図 3 参照)。こうしたことも Griffith クラックがガラス表面に一樣に存在すると考えると、表面積が小さくなるほどクラックの数も少なく、したがって大きなクラックの存在確率も小さい、として説明されている。いずれにしてもこの Griffith の考えが久しい間ガラスの強度を説明する唯一の理論であり、今日におい

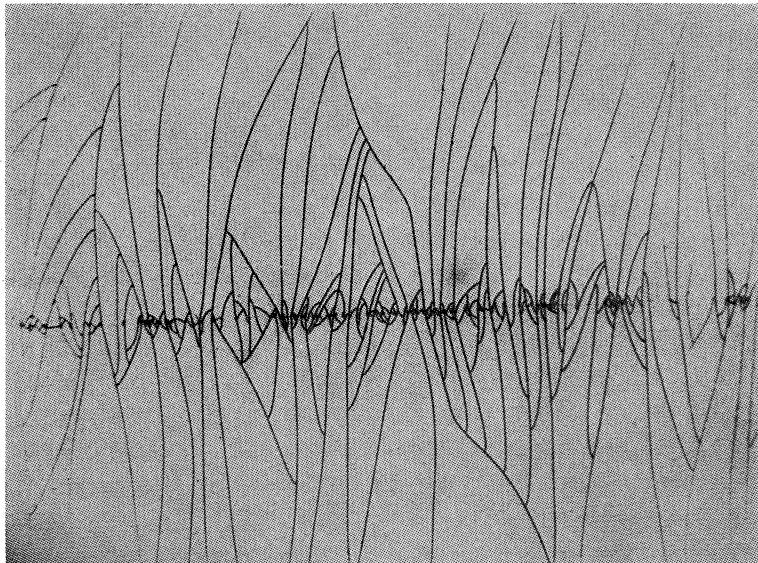
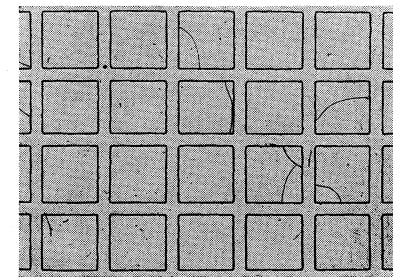
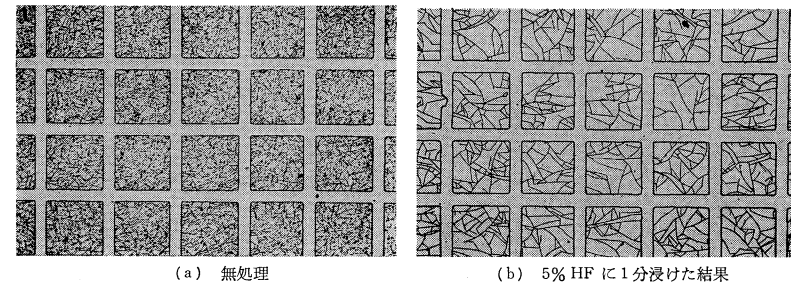


図 1 ガラス繊維がすったガラス表面に発生した Griffith クラック



(c) 5% HF に 3 分浸した結果

図 2 フッ酸処理による Griffith クラックの減少

てもその大勢に変わりはない。

このような Griffith クラックは当初は仮説にすぎなかったが、その後適当の処理によってクラックの存在を直接みることができるようになった。たとえばイオン交換法で、ふつうの板ガラスの場合リチウムを含む熔融塩と接触させて、ガラスの表面層の Na イオンを Li イオンで置換させ、表面層に収縮を起こさせることによってクラックを強調させるもので、図 1 はその実例である⁵⁾。こうした方法は直接的ではあるが、その化学的処理の過程が与える影響について、多少の疑問が残らないでもない。一方フッ酸でガラスの表面層を溶し去ってやると、ガラスの強度が増大することがかなり古くから知られており、これも Griffith クラックの存在を証拠だてる有力な事実である。すなわちフッ酸処理により、当然クラックの中にも液が浸透してゆくが、侵蝕によってクラックの間隙は広げられ、その先端の曲率半径は増大してゆく。したがって完全にその影響がなくなるににしても、応力集中の効果は軽減されてゆくのであるから、ガラスの強度は増大してゆくはずである。この事実を上述の処理によって定性的に示しているのが図 2 の a, b, c である。

3. 処女ガラスの強度

このように Griffith の理論は次第にはっきりと裏付けられるようになったが、それをさらに定量的な議論へとすすめてゆくには、Griffith クラックのまったく存在しないガラス、いわゆる処女ガラスの強度をはっきり知ることが必要である。この処女強度——正確には処女ガラスの強度らしきもの——を実際の測定で示したのはまず Thomas⁶⁾である。前述のようにガラス繊維の強度はその試料の直径や長さに依存するもの、サイズ効果

は不可避的なものと考えられてきた。ところが Thomas の実験においては、均質なガラス、十分な溶解などというまでもないが、ガラス繊維を引出してから測定まで試料を他のものに触れさせないほか、その間の時間でもできるだけ短くし、かつ低湿度の条件下で実験するなど十分な注意を払うことによって、図 3 にみられるようなガラス繊維の直径に依存しない結果が得られた。しかもその値は、 380 kg/mm^2 というこれまでにない高い値で、測定値のばらつきのほとんどない正確なものであった。こうした結果については一応処女強度と認めざるを得ないのであろうか。

一方、前述のようにガラスの表

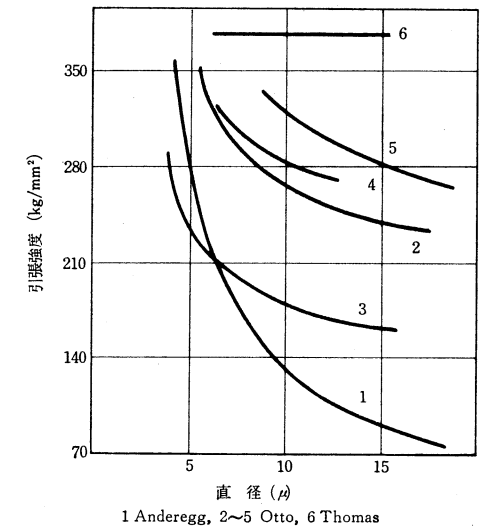


図 3 ガラス繊維の強度と直径の関係

面層をフッ酸処理で取除いてゆけばガラスの強度は増大するわけで、これは Griffith クラックがある意味で除去されていったと考えられる。このような方法で測定されたものも 300 kg/mm^2 以上の値が観測されているが、そのばらつきが大きい信頼性に乏しい。そこで原⁷⁾は次のような実験を行ない処女強度を推定している。すなわち不確定な Griffith クラックの影響を除くため、ピッカ硬度計を利用して Griffith クラックより大きい一定のクラックを与え、ガラスの破壊実験を行なうと、すべての試験は与えられたクラックを起点としてこわれ、かつ一定の強度値を与える。このような試料の表面層をフッ酸処理で取除き、クラックの深さを測って応力集中係

数を近似的に求め、完全にクラックのない状態のガラスの強度を推定すると、高い一致で 300 kg/mm² という値が得られる。これも確かに処女強度と考えられる実験であり、またデータである。なおこの実験はソーダ石灰ガラスを使用しており、前記 Thomas の実験では E-ガラス (CaO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂ 系) を使っている。

さて、これらの結果が処女ガラス強度であるかどうかについては後で議論するとして、一応そのことを肯定する立場に立つと、Griffith クラックはガラスに本質的なものではなくなる。すなわち外部からの機械的にうけた表面のきずであって、したがってガラスの内部にまで分布するものではない、ということになる。またサイズ効果の原因も前述の Griffith クラックの確率的説明よりもたわみやすいガラス繊維の方が板ガラスより機械的損傷をうけにくい、と考える方が正当であるかも知れない。ただガラスの場合なぜ機械的衝撃を受け、2 次的なものにしても Griffith クラックが容易に発生するか、ということとは疑問として残る。ガラスは完全弾性体で塑性変形がないので応力が緩和されないためだ、といった説明も納得できない。ビッカス硬度計によるダイヤモンドの圧痕などに、ガラスでもある程度の塑性流動があるといわれている⁸⁾。

4. ガラスの組成と強度

Thomas の実験で得られた結果が処女ガラス強度であるとして、前記理論強度との間にかなりの開きがあるわけで、これらの点について検討するのに先立って一、二の問題に触れておきたい。その一つはガラスの組成と強度の問題である。これまでのガラスの強度に関する実験は、ほとんど特定の实用ガラスかシリカガラスに限られている。しかも理論強度と実際に測定されたガラスの強度との間には、ごく一部を除いて大きな開きがある。したがってこうした関係を確かめてゆくには、ガラス組成の違う、したがってガラスの構造やそれを形成している化学結合も異なる、種々のガラスの強度に関する知識を比較検討してゆく必要がある。著者らの研究室⁹⁾では B₂O₃-SiO₂-Na₂O 系のガラスの引張り強度を調べているが、これら 3 成分系ガラスは实用ガラスやシリカガラスにくらべて耐水性、耐風化性が悪いこともあって、また十分信頼度の高いデータを得たとはいえない。図 4 はこの 3 成分系ガラスについて、4 配位の %、(1) 式による理論強度、硬度、弾性率の変化の傾向を比較しているもので、それぞれの曲線は Na₂O の量が一定で B₂O₃ を SiO₂ で置換してゆくときの変化を示している。B-O 結合と Si-O 結合の差を無視すれば、4 配位の % はいわば構造を表わすパラメータである。ただその計算は、B₂O₃ 中の B は Na イオンの存在量だけ全部 4 配位化していると仮定し、単純化されているので、とくに Na₂O 30 mol. % の系などは、当然実際の 4 配位の % は図の曲

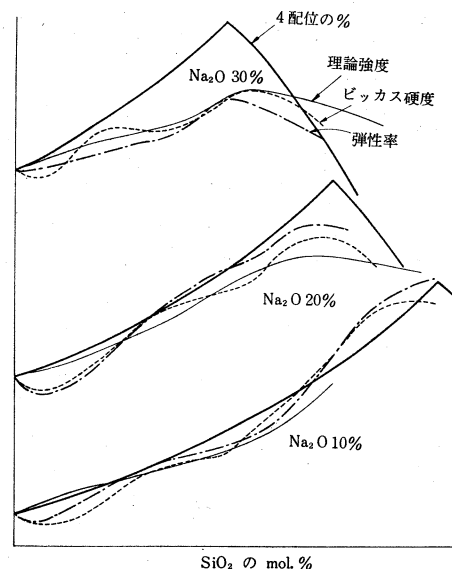


図 4 B₂O₃-SiO₂-Na₂O 系ガラスの網目構造中の 4 配位の % と強度、硬度、弾性率の変化

線を下回るはずである。こうした点を考慮すれば理論強度も硬度や弾性率も、構造変化に十分対応していると考えられる。また実際のガラスの強度測定の結果も、不十分ながら理論強度の 1/4~1/5 の値で平行しているとみてよいだろう。前記 Thomas の E-ガラスの測定値は理論値の 1/3 以上とみられる点から、この結果に処女強度といった意味合いが薄いことを認めないわけにゆかない。したがって現在ここから多くのことはいえないが、実際のガラスの強度の測定結果も、少なくとも定性的にはガラス構造と関係づけられよう。このことはもちろん当然といえば当然のことであるが、ガラスの強度に関するこれまでの考え方に裏付けを与え、Griffith クラックやその他の 2 次的影響を正当に評価し、取除いてゆく上に大きな意味をもつ。それがさらに定量的な議論にまで進められるようになると、ガラスの強度の問題が解けてゆくだけではなく、逆にガラスの構造を論ずる上にも有力な論拠となるであろう。

5. ガラスの疲労

さて第 2 の点はガラスの疲労ということである。すなわちガラスの強度は、加重時間が長いほど小さな値を示す。しかしこの疲労は水分を含む大気中では普通の現象であるが、液体窒素以下の低温とか真空中では起こらない(表 1 参照)。このことから荷重のかかった状態でクラックが水分の影響を受ける、と考えられてきた。しかし Mould⁹⁾は Thomas の使った E-ガラスで実験して、荷重時間 10 秒では強度が 372 kg/mm²、0.01 秒では 429 kg/mm² と上昇することを報じており、処女ガラス(と考えられる)でも、疲労が現われることになる。ただ、Griffith クラックのある普通のガラスにくらべると変化

表 1 強度におよぼす加重時間の効果
破壊強度 (kg/mm²)

加重時間(秒)	常温水中	液体 N ₂ 中
0.0025	6.79	8.76
0.012	6.44	—
0.05	5.95	8.81
0.226	5.39	—
0.82	5.04	—
4.0	4.69	—
15	4.20	8.81
60	3.78	—
600	3.36	—

が小さく、また非常に荷重時間の短い試験にも問題があるような気がする。しかしこうした結果を全面的に受入れるとすると、処女ガラスにも Griffith クラックより小さい不可避的で一定したミクロクラックが存在するとかあるいは Griffith クラックの起点となりうる潜在中欠陥が存在する、といったことが考えられよう。それはまた処女ガラス強度が理論強度をかなり下回る、ということにも関係してくる。

ガラスを真空中におくとか低温で強度を測定すると、前述のような疲労が現われないだけでなく、強度の値そのものも大きく変化する。たとえばシリカガラスについての Morley ら¹⁰⁾の実験によれば、常温ではおよそ 600 kg/mm² の強度を示したものが、78°K では約 1400 kg/mm² という大きな値を与える(図 5 参照)。また前記 E-ガラスについての Cameron¹¹⁾の実験では、Thomas と同様空気中の常温で 390 kg/mm² 程度の強度のガラスが、83°K では 590 kg/mm² に達する。また真空中におくことによって強度が増大するが、10⁻³ torr 程度以上の高真空中に十分長時間保持することによって効果が現われ、およそ 25% 位の増加がみられる。また -50°C 以下の低温になると強度はさらに増大し、もはや真空中にすることの効果はなくなる。したがってこの場合も空気中の水分が影響していると考えられる。一方 Orowan の式に

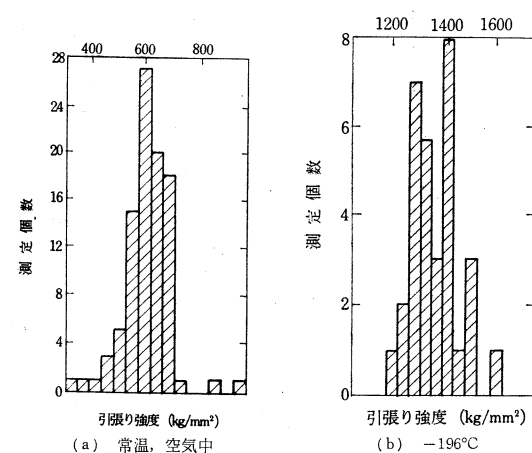


図 5 シリカガラスの強度

表 2 板ガラスの破壊エネルギー

共存する媒質	破壊エネルギー(dyne/cm)
水	2900
空気(種々の湿度)	3700~4300
アセトン	3700
水 銀	3700
50% KOH 水溶液	3800
エチルアルコール	4000
リン酸	4200
流動パラフィン	6500
シリコンオイル	7100
N ₂ ガス	7600
CO ₂ ガス	7800

よれば、ガラスの強度はガラスの表面エネルギーに關係し、これは当然表面に吸着される物質によって左右される。Culf¹²⁾は表 2 のように種々の媒質の下での板ガラスの破壊エネルギーを測定している。破壊エネルギーは新しい破面を作るに要するエネルギーで、表面エネルギーだけではなく破面を作る際の塑性変形のエネルギーも含んでいる。しかし表 2 にみるように空気中(水分を含む)と、CO₂ ガス中では倍以上違うことは上の問題を考えてゆく際にも、十分考慮されねばならないことである。

6. 理論強度と実測値との差

そこで最後に理論強度と処女ガラス強度との開きについて考えてみよう。そのことはまたガラスの実際の強度の可能な限界、ということにも関連している。ガラスの強度の測定値としてこれまでの最高は、シリカガラスを低温で測った Morley の 1400 kg/mm² という値である。これは鉄の Whisker の値に匹敵するもので、またヤング率から計算した理論強度ともほぼ一致する。Orowan の式には表面エネルギー α が入っており、測定条件の影響をうけるので、前記の 1000 kg/mm² と Morley の値とを直接比較することはできない。しかしこの数字はかなり理論強度に近いものであることは確かで、その意味で大きな意義があると思う。ただ同じ測定で常温での結果(600 kg/mm²)との差が大きいこと、またシリカガラス以外のガラスとの差も著しい点が問題として残る。

さて、一般にガラスの強度が理論強度に達しない原因として、次のようなことが考えられる。すなわち、(1) Griffith クラックのような表面欠陥、(2) ガラス特有の構造欠陥、(3) 泡などもう少しマクロな欠陥、(4) 原子の熱振動の影響、(5) クラックの成長を助ける因子としてふんい気の影響、(6) 塑性流動などである。まず処女ガラス強度が得られているとして、(1) を除外して進もう。そこで内部的欠陥として(2)、(3) が考えられる。ガラス繊維の中の泡については、その製造過程で引張り方向に引伸ばされて応力集中への効果は小さいとみられていたが、Hillig¹³⁾などは十分小さな泡は張力を受けても表面張力で球形が保たれるといっている。しかし、

Thomas の結果がばらつきの小さいことから、均一な泡を仮定しなければ説明しにくい。また板ガラスを使った、原の実験などでは、当然泡の影響は考えにくい。次に構造欠陥であるが、これも純然たる原子配列の乱れといったものは、あまりにマイクロでかつ均一で問題にならない。当然もっと大きな組成の片寄りとか分相といったものが考えられよう。シリカガラスにはそれは存在しないわけであるが、シリカガラスとその他の多成分系ガラスとの強度の違いの説明にはなりうる。こうしたことの根底には、多成分系ガラスの中には異種の結合が混存しており、前述の B_2O_3 ガラスで指摘したようにその中の結合のもっとも弱い部分が問題になる、ということがある。ただ後者はむしろ理論強度の算定の問題であり、前者はある程度溶融技術の問題でありうる。(4)の原子の熱振動の効果については、Hillig¹³⁾ の計算によれば否定的である。ただシリカガラスの例のように、低温での強度の大きい原因の一部として、その可能性が本当にはないのだろうかという疑問が残る。(5)のふんい気の影響は、前述の Cameron の実験で、真空中に 1000 時間以上も試料をおくことによって、ガラスの強度が少しずつ上昇してゆくことから、Griffith クラックの成長を助けるとか、ガラスの表面エネルギーの大きさの影響以外にも、ガラス表面でガラスの強度に影響するある効果をもつことが想像される。これまでの実験では測定が真空中で行なわれた場合でも、その試料の製造過程は水分を含んだ大気中で行なわれており、シリカガラスなどはとにかくとして、この影響を無視することはできないと考える。最後に(6)の塑性流動であるが、前述のように従来ガラスにはまったくないと考えられてきたものが、最近ではある程度認められている。ただそれがどの程度で、実際の理論強度をどれだけ引下げるものであるかわからない。荷重時間による強度の変化も塑性流動の効果と考えられなくもないが、真空中でいわゆる疲労効果(荷重時間による強度の低下)がないことから、受入れられない。いずれにしても現在のところ、塑性流動が破壊応力を低下させているという論拠ははっきりしない。

以上の議論から明らかなように、ガラスの強度に関してははっきりわかっていない点が多い。また実験的研究の面でもまだまだデータ不足で今後待つ面が多い。したがってここでは十分な結論を得ないで終らざるを得ないが、著者らの研究室でも真空中での強度実験の準備を進めており、さらに問題の本質的解明に向かって努力して

いきたい。

あとがき

ガラスの強度については未解決な点も多々あるが、これまでの実験の積み重ねによって得られた強度の測定値は次第に大きくなってきた。このことは制限された条件の下であるにしても、現実強いガラスが作られたことで、実用的にも強力な強化ガラスが作られる可能性が示されたといえよう。これまで作られてきた強化ガラス、また最近の化学強化法にしても、表面に圧縮層を作る方法であって、Griffith クラックは問題にしていない。板ガラスの表面をフッ酸で溶かし、Griffith クラックを取除いてゆくと 300 kg/mm^2 程度の強度が得られるという。これは従来の強化ガラスの強度より 1 桁位大きいものである。そこでこうした Griffith クラックのないガラスを作るということが、ある意味強いガラスを作る本質的解決策であるに違いない。同じようなことが別の形で金属について考えられているのではないだろうか。金属の場合は結晶中の欠陥である転位の存在がその強度を弱めており、転位のない Whisker によって本来の強さが示された。そこで発生した転位をいかに釘づけにしておくか、ということが強い金属材料を作る上での問題点である。ガラスの場合はそうした内部欠陥ではなく、むしろ本質的には 2 次的な外部よりの損傷であるとすれば、弱いわれやすいガラスが、必ずや強くわれないガラスに変わる日がくる、と信じてよいかも知れない。

(1968 年 12 月 2 日受理)

引用文献

- 1) I. N  ray-Szabo, J. Ladik, Nature, **188**, 226 (1960)
- 2) ガラス工学ハンドブック, 194 (1963)
- 3) 今岡稔, 長谷川洋, 黒滝祐幸, 第 3 回ガラス部会討論要旨集, 120 (1968)
- 4) A. A. Griffith, Phil. Trans. Roy. Soc., **A 221**, 163 (1920)
- 5) F. M. Ernsberger, Advances in Glass Techn., **511** (1962)
- 6) W. F. Thomas, Phys. Chem. Glasses, **1**, 4 (1960)
- 7) M. Hara, Rep. Res. Lab. Asahi Glass Co., **14**, 71 (1964), 精密機械, **31**, 57 (1965)
- 8) D. M. Marsh, Proc. Roy. Soc., **A 279**, 420 (1964)
- 9) R. E. Mould, J. Appl. Phys., **29**, 1263 (1958)
- 10) J. G. Morley, P. A. Andrews, I. Whitney, Phys. Chem. Glasses, **5**, 1 (1964)
- 11) N. M. Cameron, Glass Techn., **9**, 14 (1968)
- 12) C. J. Culf, J. Soc. Glass Techn., **41**, 157 (1957)
- 13) W. B. Hillig, Modern Aspects of the Vitreous State II, 152 (1962)

UDC 621.039.83; 621.362

ラジオアイソトープ発電器

Radioisotopic Power Generator

加 藤 正 夫*・佐 藤 乙 丸*

Masao KATO and Otomaru SATO

放射性物質の壊変エネルギーを利用して発電する試みは、かなり昔から研究されてきたが、その歴史的な発展について概説した後、熱電気変換装置を用いるアイソトープ発電器の原理、構造、使用アイソトープの特性、熱電気変換方式などについて述べ、最後にこの発電器の安全性、経済性、用途などにふれた。

1. ま え が き

放射線エネルギーを、電力に変換しようという試みは、1913 年の Moseley の原子電池の論文¹⁾に始まる。しかしこのときに作られた電池は 150 kV , 10^{-11} A というもので、その用途が考えられなかったことおよび、放射性同位元素の供給がまだ不十分であったことから、それほど注目されなかった。

それでも、その後原子電池として以下の 3 種の方式のものが開発された。すなわち第一に、放射性同位元素を塗布した陽電極から放出される β 粒子をそのまわりの円筒状陰極で捕集する電池、第二に PN 接合面へ放射線をあてたり、コンプトンリコイル電子を捕集したりする電池、第三に放射線を蛍光体に吸収させ、発生する可視光線を太陽電池で電気出力に変換する電池である。

これらはいずれも出力数 mW 前後のもので、使用放射能も数 10 mCi から数 100 Ci 程度、高電圧、小電流の小型電池で、おもに ^3H , ^{85}Kr , ^{90}Sr などの長半減期の β 線放射体をエネルギー源としている。一部はかなり前から市販されている。

1940 年代後半にいたり、人工衛星の研究の一端として放射性物質を熱源とする電気出力の大きい電源に関する研究が行なわれるようになった。その理由は、長寿命でしかも信頼度の大きい電源を開発する必要にせまられたからである。こうして 1954 年米国において、 ^{210}Po , ^{57}Co を熱源とし、熱電対(クロメル・コンスタンタン)を利用した出力 1.8 mW の小型アイソトープ発電器が試作された²⁾。

アイソトープ発電器は、放射性同位元素の壊変によって生ずる放射線のエネルギーを熱源とし、熱-電気変換装置を用いて電気出力を得る発電器である。図 1 はその原理図で、放射線をしゃへいする物質、放熱板および放熱調節装置、直流-直流変換装置などを伴う場合が多い。

1957 年に米国原子力委員会は、放射性同位元素および原子炉を用いた宇宙用電源開発計画、いわゆる SNAP 計画をたて、その第 1 号機として ^{144}Ce を用いた 133 W の発電器の開発を取りあげた。これが SNAP-1 であり、

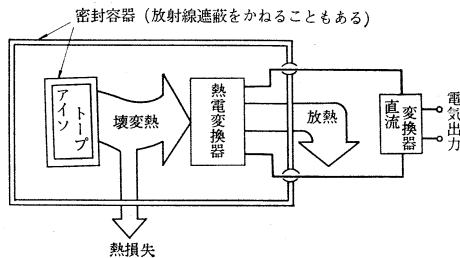


図 1 アイソトープ発電器の原理図

以後は放射性同位元素を熱源とするものを奇数で、原子炉を熱源とするものを偶数でらあわしている。

この SNAP 計画の確立とともに、アイソトープ発電器の開発研究が進歩し、1961 年には ^{238}Pu , 1600 Ci を熱源とする電気出力 2.7 W の SNAP-3 B が航海衛星 Transit 4 A および 4 B に積みこまれて初めて宇宙空間に打ち上げられた。また 1963 年には電気出力 25 W の SNAP-9 A も打ち上げられ実用段階に入った。

地上用のアイソトープ発電器も、並行して開発され、1961 年に ^{90}Sr , 17500 Ci を熱源とする電気出力 5 W のものが、北極から 1100 km はなれた Axel Heiberg 島に、無人気象観測用電源として設置された。この型のものが表 1 の SNAP-7 シリーズに発展したのである。図 2 に示した SNAP-7 B の断面図からも明らかなように、中心部に円筒状の燃料容器があり、その外側に Pb-

表 1 SNAP-7 シリーズの動作特性

	7A, 7C	7B, 7D	7E
燃料化学形状	SrTiO_3	SrTiO_3	SrTiO_3
燃料数量	$40,000 \text{ Ci}$	$225,000 \text{ Ci}$	$31,000 \text{ Ci}$
燃料容器	ハステロイ C	ハステロイ C	ハステロイ C
熱電素子	鉛テルル	鉛テルル	鉛テルル
熱電対数	60	120	60
熱絶縁体	Min K 1301	Min K 1301	Min K 1301
しゃへい材	減損ウラン	減損ウラン	錳鉄
高温端	783°K	763°K	683°K
低温端	339°K	333°K	290°K
電気出力	11.6 W	68 W	6.5 W
熱入力	256 W	1440 W	198 W
発電器効率	4.5%	4.7%	3.3%
重 量	850 kg	2090 kg	1020 kg
寿 命	10年	10年	5年

* 東京大学生産技術研究所 第 4 部