

黒鉛製品の破壊に対する温度影響について

吉 識 雅 夫・竹 鼻 三 雄・助 川 政 之

(1958年2月4日受理)

Effect of Temperature on the Fracture of Graphite Products.

Masao YOSHIKI, Mitsuo TAKEHANA and Masayuki SUKEGAWA

(Received February 4, 1958)

ABSTRACT: Three kinds of graphite products, two non-permeative graphite (F and S) and one ordinary graphite (E), were tested under compression, bending and wedge indentation at various temperature. The specimens were tested in a bath filled with cooled alcohol or heated soya-bean oil, and the test temperature was regulated between -50°C and 200°C .

Under low temperature, the compressive strength σ_c of F and S is mainly governed by critical tensile stress σ_0 , which is assumed to be equal to $\sigma_b/1.5$, and σ_b is the strength obtained from the bending tests. Under higher temperature, on the other hand, σ_c of these two products is governed by critical shearing stress τ_0 . The fractured surfaces of these two products show brittle appearance under low temperature, but as temperature rises they tend to show ductile appearance.

The wedge indentation strength σ_w , shows nearly equal tendency as σ_c , but the bending strength σ_b under higher temperature considerably differs from τ_0 in its temperature gradient.

The critical tensile stress σ_0 and the critical shearing stress τ_0 are expressed as follows:

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= Ae^{S/T} \\ \tau_0 &= Be^{U/T} \quad (S > U)\end{aligned}$$

where A , B , S , U are material constants and T is absolute temperature.

Material E shows no temperature effect up to 200°C , and always shows brittle fracture.

1. 緒 言

人造黒鉛製品は電極としての従来の用途に加えて、近時特別の処理を施すことによつて不滲透性とし併せて機械的強度を改善したものが化学機械装置用として多量に用いられるようになった。著

者等は数年前これら数種の黒鉛製品について低温 (-50°C) より高温 (200°C) に至る間の機械的強度を調査したが、その際にあるものは温度の変化に伴つて破壊の様相および破壊面の状況が判然と遷移することを発見した。このことは一般に材料の破壊強度に及ぼす温度の影響の解明に利用出

来るとの観点より温度を変化した数種の強度実験を系統的に行い、破壊強度と破壊の状況との関係を探求した。本論文はこれらの実験結果について考察を行ったものである。

2. 実験の方法

実験の種類は円柱圧縮試験、矩形断面梁の曲げ試験と裂開試験および中央に孔を明けた矩形板の圧縮試験の4種類である。材料は黒鉛と石炭酸樹脂の含有率の異なる F・S・E の3種類を用い、試験温度は -50°C より 200°C の間の6段階で行った。

2.1 試験片

使用した黒鉛材料のうち F と S は不滲透質人造黒鉛であつて、黒鉛の粉末と石炭酸樹脂の粉末とを金型に入れて加熱加圧を行つて成型したもので、これらは化学機械のパッキングまたはシール材料として使用されるものである。E は通常の人造黒鉛電極材である。使用材料の成分割合を第1表に示す。

第1表 使用材料の成分割合

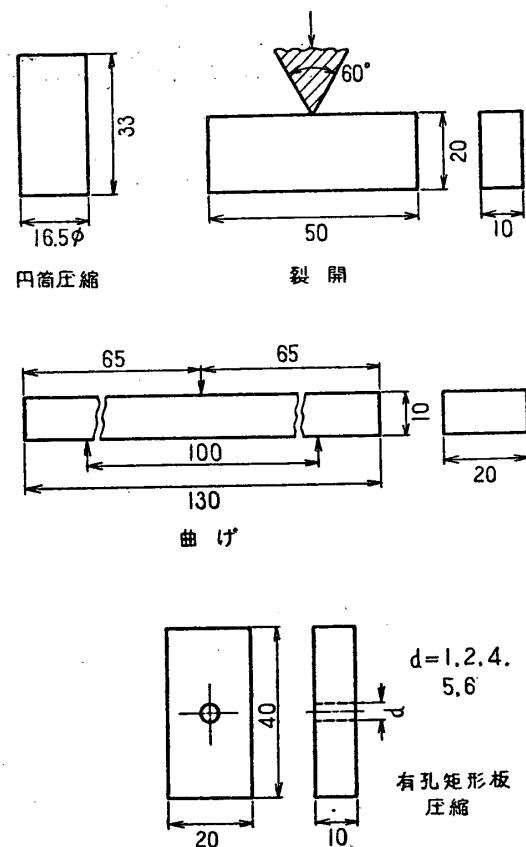
記号	黒鉛 (%)	石炭酸樹脂 (%)	その他 (%)
F	10	90	—
S	77	23	—
E	99.5	—	0.5

試験片の寸法は第1図に示す。

試験片の製作に当つては各1個毎に硬度と電気抵抗を測定して素材の成分の偏差の少ないものを選び、特性の揃つたものだけを試験に供した。また有孔矩形板圧縮試験片は $8'' \times 6'' \times 4''$ の材料 S のブロックから $7 \times 3 \times 7 = 147$ 個の試験片を切出し、そのうちから比重の揃つたもの 107 個を使用した。なお試験片の厚さ方向が成型の際の加圧方向となるようにし、板面内の異方性の影響を除いた。各試験片の個数を第2表に示す。

2.2 実験装置

圧縮試験にはアムスラー型ねじ棒駆動式5噸万能試験機を、曲げと裂開試験には同じく1噸型を夫々適当な荷重範囲にして使用した。広範囲な試

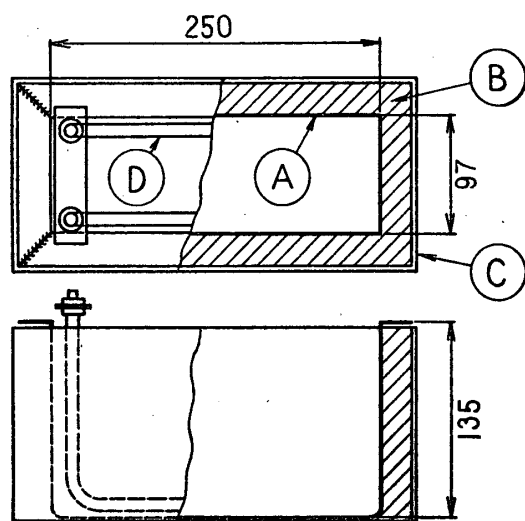


第1図 試験片の寸法 (単位 mm)

第2表 試験片の個数

試験の種類	材料	孔径 (mm)	試験温度 ($^{\circ}\text{C}$)					
			-50	0	50	100	150	200
円柱圧縮	F	—	1	1	1	1	1	1
	S	—	5	5	5	5	5	5
	E	—	3	3	3	3	3	3
曲げ	F	—	2	2	2	2	2	2
	S	—	4	4	4	4	3	4
	E	—	1	1	1	1	1	1
裂開	F	—	2	4	4	4	2	2
	S	—	2	7	7	7	2	2
	E	—	1	1	1	1	1	1
有孔矩形板圧縮	S	1	3	—	6	—	—	4
		2	4	—	8	—	—	5
		4	5	5	8	5	5	5
		5	5	5	5	—	—	—
		6	5	5	8	—	—	5

験温度で実験するために第2図に示す恒温槽を使用した。この恒温槽は鋼板製の容器中に所定温度に保つた液体(媒液)を入れ、容器の四囲はフェ



A は鋼板製液槽, B はフェルト, C は木箱, D は 500 W×2 ヒーター, を示す。

第 2 図 恒温槽 (単位 mm)

ルトと木箱で二重に包み熱の出入を防いである。円柱圧縮試験では容器の底部に厚さ 30 mm の鋼板を敷いて試験片の台とし、底面を平滑に仕上げた直径 50 mm, 長さ 150 mm の円柱状金具を試験機の頭部に取付けて圧縮荷重を加えた。裂開試験は円柱状金具の下端に焼入処理を行つた頂角 60°, 先端曲率半径 0.2 mm の楔形金具を取付けこれを試験片に圧入して行つた。曲げ試験ではスパン 100 mm の三点曲げを行わせるために試験機の頭部に負荷金具を、容器の底部に支点金具を取付け、負荷点と支点の先端は直径 10 mm の円柱面とした。有孔矩形板の圧縮試験では端面の摩擦条件を温度が変化しても変らないようにするため、試験片をシリコン油を充した直径 73 mm, 高さ 69 mm のアルマイト製のコップに入れ、このコップを前述の恒温槽中に置いて二重油浴形式によつて加熱または冷却することとした。

高温 (50°C~200°C) 試験には媒液として大豆白絞油を用い、500 W パイプ型ヒーターを 2 個入れ、その電流を調節することによつて所定温度に保つた。低温 (0°C~ -50°C) 試験には無水アルコールにドライアイス投入して温度を調節した。試験中の温度変化は高温で $\pm 5^\circ\text{C}$, 低温では $\pm 2^\circ\text{C}$ 以下であつた。試験片は実験前 10 分間以上恒温槽中に浸し、全体が均一に所定の温度となるようにした。

円柱圧縮、曲げおよび裂開試験においては普通

の方法で破壊まで連続して荷重を上げて最高荷重を記録した。有孔矩形板圧縮試験では最高荷重に達した際に試験片の粉碎されることを避けるために、高温試験では試験機の荷重盤の指針が上昇を停止した瞬間にペンデュラムを手で持上げて荷重を除くようにし、中温の場合は試験片に亀裂の入つた瞬間に発する小音響を聞き前述の方法で直ちに荷重を除く。低温の場合は最高荷重点で突然大音響を発して粉碎されることが多いが、指針の動きと小音響とに注意して指針が一瞬停滞するか小音響を聞くと同時に荷重を除くようにした。

2.3 亀裂およびむりの測定

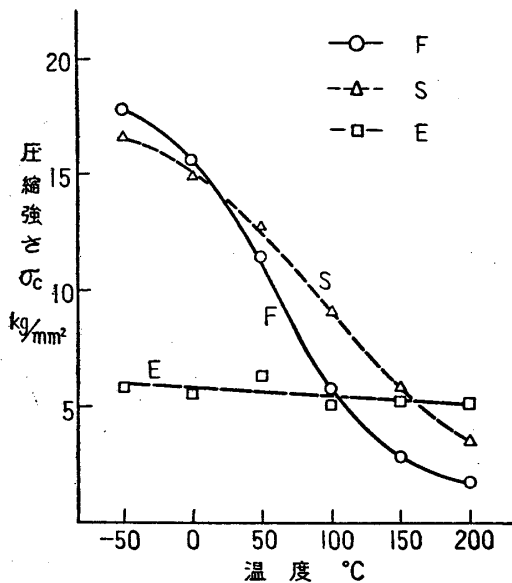
有孔矩形板の圧縮試験の結果、孔の周囲と端面附近に生ずる亀裂とむりの大いさと方向を次の方法で測定した。まず試験片の表面を充分拭つて油、アルコール分を取去つた後、エメリー紙 04 番程度迄良く研磨し鏡面反射を行わせると亀裂またはむり線のある部分は反射率の相違により判定が出来る。この際手で横方向から圧力を加えると亀裂の部分から油が滲み出して来て発見が容易になり、光線の入射角度を適当にすれば判然と写真撮影することが出来る。

3. 実験の結果

3.1 円柱圧縮試験

円柱圧縮試験において得られた最高荷重より圧縮強さ σ_c を求めその平均値を温度に対して図示したのが第 3 図である。材料 F と S では σ_c が温度によつてその値が変化するが、50°C 以下では温度の影響がやや少くなる傾向を示し、又 F は S よりも温度の影響が大である。材料 E では温度による σ_c の変化が殆んど認められない。各材料について圧縮破壊状況と破断面の代表的なものを第 4~7 図に示す。

第 4 図は材料 S の各温度における破壊状況であつて、夫々 a) -50°C, b) 0°C, c) 50°C, d) 100°C, e) 150°C, f) 200°C におけるものを示す。低温では端面の部分またはその附近から斜方向に生じた短い亀裂の先端から縦方向の割れが起つて試験片は分離して破壊するが、高温では上下端附近から斜に入つたむり亀裂がそのまま斜方向に連続して進み、試験片を貫通して破壊する。写



第3図 圧縮強さと温度との関係

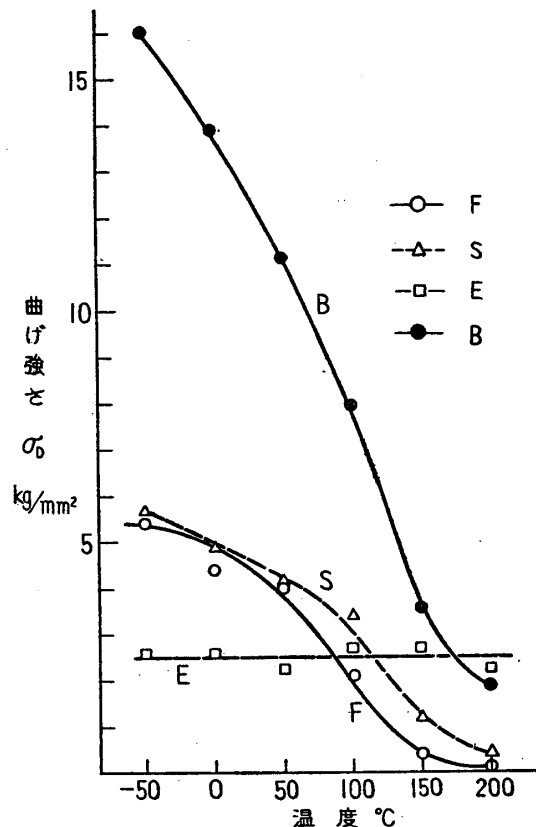
真に見える縦方向の割れは破壊の際の試験機の慣性によつて二次的に生じたものである。

破断面は第5図に見られるように、低温 a) 0°C では頂部附近に粗粒状の迂り破面が僅かにあるが、大部分は細粒状の分離破断面で占められている。中温 b) 100°C となると大部分が迂り破断面に移行し、高温 c) 200°C では全部が迂り破断面となる経過が判明する。

第6図は材料 F の破壊状況で、a) 0°C, b) 100°C, c) 200°C におけるものを示す。材料 S と殆んど同様の破壊模様をあらわしている。第7図に示す材料 E の破壊状況は前二者と異り、a) -50°C, b) 100°C, c) 200°C について見ても温度に関係なく頂部に迂りによる楔形が形成せられて後に、その楔形の先端附近から縦割れが始まっている。このことは第3図において材料 E の σ_c が温度によつて変化しないことと一致している。

3・2 曲げ試験

曲げ試験から得られた曲げ強さ σ_b の平均値を第8図に示す。材料 S および F は温度の影響を受け、かつ材料 F は S よりも影響が大であること、材料 E は温度の影響がないことなどは総て円柱圧縮試験と同一の傾向を示している。図中の曲線 B は同一寸法のベークライト板で行つた実験の結果を参考に示したものである。ベークライ



第8図 曲げ強さと温度との関係

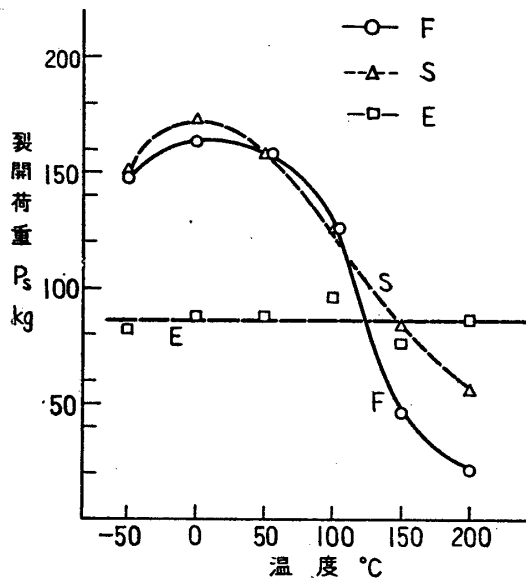
ト板は市販の積層布形式のものであるが、非常に温度の影響が大であることが判る。

3・3 裂開試験

裂開試験で得られた最高荷重 P_s の平均値を第9図に示す。裂開試験の際に金具と接触する部分に生ずる試験片内の応力状態は複雑であるが、破壊に有効なものは楔形金具が貫入する際に試験片を左右に押し拡げる分離応力（引張応力）と、接触点から斜方向の面内の剪断応力とであつて、温度によつて何れか弱い方の応力で破壊が起る。

第9図で見ると材料 S と F とは高温では温度影響が大であるが低温では殆んど影響を受けず、材料 E は全然温度影響を受けない。また材料 F は S より温度影響を多く受ける点において円柱圧縮および曲げ試験と類似しているが、ただ前二者の試験に比較して強さに対し温度の影響があまり大きくない範囲が高温の方に拡がっていることである。これは試験方法の相違によるもので、裂開試験では分離力の方が剪断力よりも大であるために、中温でも分離破壊が起り易く従つて

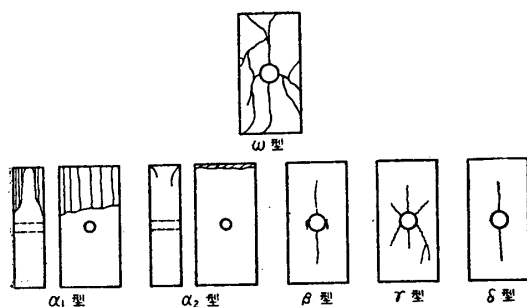
80°C 附近までの最高荷重はこの分離破壊によつて決定せられるからであらうと考えられる。



第 9 図 裂開荷重と温度との関係

3.4 有孔矩形板圧縮試験

材料 S について行つた有孔矩形板の破壊は孔径と温度との変化に従つて複雑な様式を示す。それらを一覧すると第 10 図に示すように 6 種類に分けられ、それらに説明の便宜上次のように符号を付けることとした。まず試験片中央の孔を通らない破壊のうち低温において端面から縦割れするものを α_1 、高温において端面の肩の部分から迂り破壊するものを α_2 とする。次に孔の周囲から開始する破壊のうち、中温において孔の左右縁の圧縮応力の集中部分より亀裂の入るものを β 、低温において孔の上下縁の引張応力の集中部分から縦割れするものを δ 、高温において孔の近傍の最大剪断応力部分から迂り破壊を起すものを γ とし、これらの破壊が起つた後更に荷重を上昇させ



第 10 図 破壊様式の分類

て β , γ または δ 型の破壊が進行し亀裂または迂りが試験片を貫通した際の破壊形式を ω と名付ける。 ω 型の破壊は試験機の慣性によつて試験片は縦割れと斜割れの混合した複雑な形状を呈し数個に分離してしまう。

有孔矩形板圧縮試験片の破壊状況の数例を第 11 図に示す。写真中試験片の面が白く光っているのは孔の周囲の亀裂と迂り線を示すために、前述の鏡面反射法で撮影したものである。a) と b) は孔径 1mm のもので、a) は -50°C にて端面より α_1 型の破壊をしたもの、b) は 200°C にて端面より α_2 型の破壊をしたものである。c) は孔径 2mm, 50°C の場合で孔の周囲に γ 型の迂りと縦亀裂がみられる。d) ~ f) は孔径 4mm のもので、d) は -50°C で孔の周囲より β 型の破壊と縦割れをして居り、e) は 150°C における ω 型破壊、f) は 150°C における γ 型破壊を示す。g), h) は孔径 5mm のもので、g) は 0°C における ω 型破壊、h) は 50°C における γ 型破壊である。i) ~ l) は孔径 6mm のもので、i) は 0°C における ω 型破壊、j) は 50°C における γ 型破壊、h) は 50°C における δ 型破壊、l) は 200°C における γ 型破壊を示す。本図によつて縦割れと迂り線とが孔の周囲に発生する割合が温度と孔径によつて変化する状況が判然と見られる。また孔径小なる場合の端面よりの破壊様式も温度によつて異なることが判る。

孔径 6mm の試験片の貫孔破壊面の状況を第 12 図に比較した。圧縮試験によつて孔の縁と上下端面とのほぼ中央まで亀裂または迂り線の入つた試験片をとり、これを常温で中央から縦に二分して破断面を露出したもので、上下端面に近い部分にある常温で割裂破壊した部分はこれを除外して考える。a) は 200°C におけるもので迂り破壊が孔の斜方向から始まりその破断面は粗粒状かつ凸凹が多いが(孔の下部)、孔の上方には拋物線状の前線をもつて孔の直上に伸びる亀裂面が露れている。しかしこの亀裂面は低温の場合よりも粗粒状であることが見られる。b) は -50°C におけるもので、孔の直上、直下から拋物線状の前線をもつて亀裂が進み、その破断面は細粒状で平坦であることが見られる。これらの破断面の遷移状況は軟鋼の切欠脆性試験に見られる延性および脆

第 3 表 各破壊型の出現度合

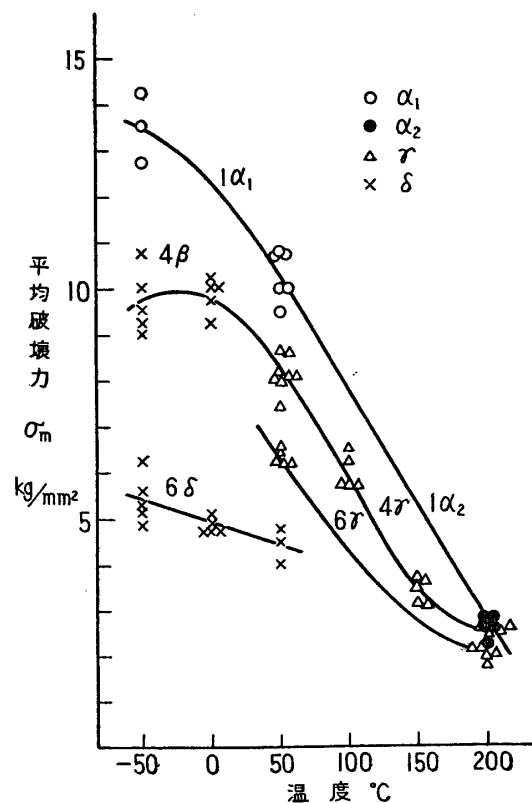
孔径 (mm)	温度 (°C)	-50		0		50		100		150		200		d/b	t/d
		型	数	型	数	型	数	型	数	型	数	型	数		
1		α_1	3/3	—	—	α_1 または α_2	6/6	—	—	—	—	α_2	4/4	0.05	10
2		α_1	4/4	—	—	α_1 γ $\beta(\delta)$	5/8 2/8 1/8	—	—	—	—	α_2 γ	4/5 1/5	0.1	5
4		β (δ)	5/5	β (δ)	5/5	γ (δ)	8/8	γ $\gamma \rightleftharpoons \omega$	4/5 1/5	γ $\gamma \rightleftharpoons \omega$	3/5 2/5	γ $\gamma \rightleftharpoons \omega$ α_2	3/5 1/5 1/5	0.2	2.5
5		δ (ω)	5/5 (1/5)	δ (ω)	5/5 (1/5)	γ $\delta \rightarrow \gamma$ γ	1/5 1/5 3/5	—	—	—	—	—	—	0.25	2
6		δ (ω)	5/5 (1/5)	δ (ω)	5/5 (1/5)	γ δ (ω)	5/8 3/8 (2/8)	—	—	—	—	γ	5/5	0.3	1.67

性破断面に類似のところがあることは非常に興味深い。

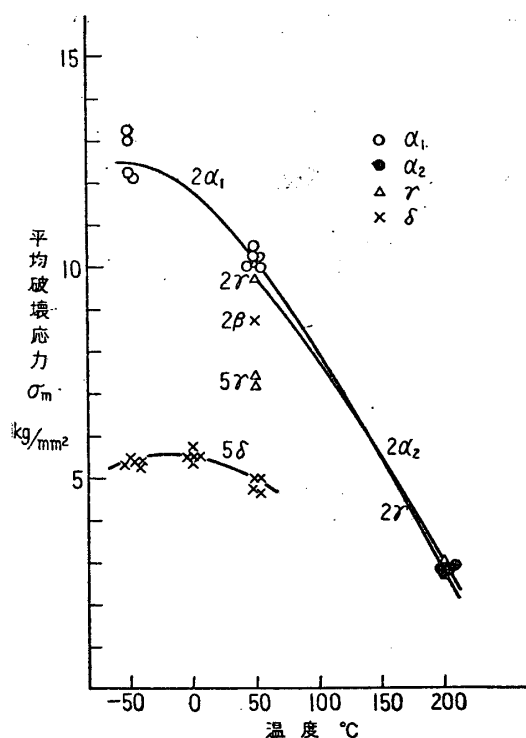
孔径と温度によつて各破壊型がどのように出現するかを第3表に示した。孔径 1mm の全部と、孔径 2mm の過半数および孔径 4mm の一部は試験片の端面より破壊するが、孔径が大になるに従つて孔の周囲に亀裂または迂り線の入るものが増し、孔径 5mm 以上は全部 γ または δ 型の破壊をしている。

50°C においては分離破壊と迂り破壊の両方が混在して居り、端面から破壊するものは α_1 と α_2 の区別がつけ難い。また孔径 4mm においては β 型と δ 型とが殆んど同時に起り始めるので何れか一方の破壊型であると断定出来ないため $\beta(\delta)$ と記してある。 $\gamma(\delta)$ も同様な意味を有する。孔径 5mm においてはまず δ 型の亀裂が入り、荷重を更に上昇させると γ 型の迂りが現われ、更に荷重を加えると ω 型の破壊をするものが見られたので $\delta \rightarrow \gamma$ と記してある。孔径 4mm においては 100°C 以上で γ 型の破壊が起ると殆んど同時に ω 型の破壊に移行するものがあるので $\gamma \rightleftharpoons \omega$ と記した。表中 (ω) とあるのはその上欄の破壊の起つた後、更に荷重を上昇させて ω 型の破壊を行わせたものである。

第 13 図と第 14 図に各試験片の平均破壊応力 σ_m (破壊荷重を無孔部分の断面積で除したもの) の値を孔径と破壊型に分類して温度に対して示し



第 13 図 有孔板圧縮試験の平均破壊応力 (孔径 1, 4, 6mm)



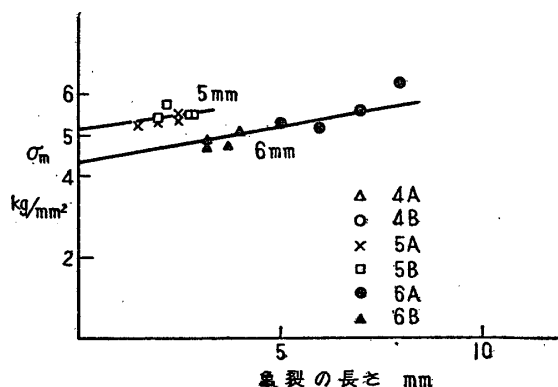
第 14 図 有孔板圧縮試験の平均破壊応力
(孔径 2, 5 mm)

た。図中の数字は孔径 (mm) を示し、実線は平均値を結んだものである。両図によつて一般に α_2 , γ 型の破壊は温度影響が大で, α_1 , β , δ 型の破壊は温度影響が少いことと, 50°C 附近は両型式の破壊が混在する領域であることが判る。

例えば孔径 5 mm の試験片を 50°C で試験したものの 5 個のうち, 1 個は 1,000 kg で小音を発してまず孔の上下に δ 型の小亀裂が入つたが, 荷重は下降せず更に荷重が上昇して 1,490 kg に至つて前よりもやや大なる音を発して孔の周囲に γ 型のちりを起した。また別の 1 個は音なく 1,450 kg まで達して後荷重が下降したので, 試験装置から取出して見ると孔の周囲に γ 型のちりが見られた。他の 3 個は皆小音を発した際に荷重を除き取出したところ, δ 型の亀裂があることが認められた。これらの試験片は孔の周囲に γ 型のちりが入つた後は, 試験機のハンドルを回しても殆んど荷重が上昇せずに全体が ω 型の破壊をしてしまう。一般に ω 型の破壊では孔の両横の圧縮集中応力部分の表面の剝離と, そこから斜に伸びる剪断割れ目, および中心線に沿つた孔の上下の亀裂とが見られる。

低温においてはこのような順次に破壊が行われ

ることはなく, 荷重を非常に緩かに上昇させるにも拘わらず, 小音を聞いて直ちに試験機のペンデュラムを持上げて荷重を除いた場合でも, δ 型の亀裂が試験片の 1/2 以上に進行していることが多く, 小音を発してから荷重を除くのが僅かでも遅れると大音と共に ω 型の破壊をして粉碎してしまう。亀裂の長さと σ_m との関係は第 15 図に示すように亀裂の長い方が僅かに σ_m が高い程度であつて, 破壊荷重に達すれば亀裂は速かに進行するものであることを示している。



第 15 図 亀裂の長さと σ_m との関係

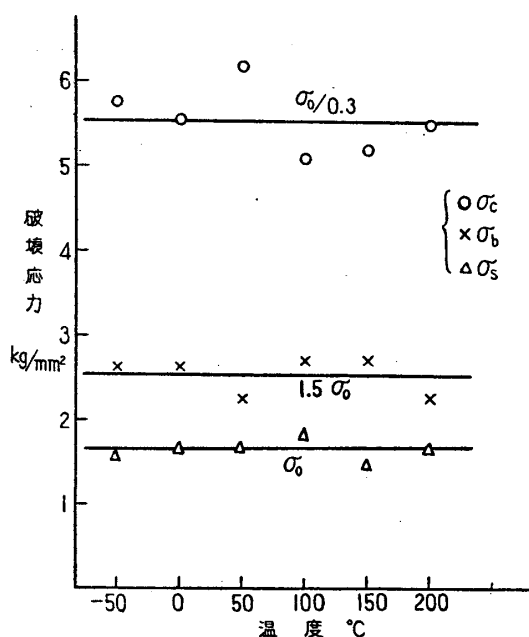
4. 実験結果の考察

以上に述べた 4 種類の実験結果について各材料毎に検討を加え, 各種黒鉛材料の強度の温度影響について考察を行うこととする。

4.1 材料 E

材料 E は人造黒鉛で殆んど不純物を含まない。第 16 図に示すように本材料では実験の温度範囲では各種強度とも温度による変化は認められない。第 16 図において σ_c は円柱圧縮試験より求めた圧縮強さ, σ_b は角棒曲げ試験より求めた曲げ強さ, σ_s は角棒の裂開試験より求めた裂開強さを示す。裂開強さは次の仮定によつて求めた。

裂開試験に用いた圧入金具の先端の曲率半径は 0.2 mm, 二側面のなす角は 60° であるから金具の先端に接触した試験片の部分は塑性変形を起して深さ 1 mm 程度の凹みを生じて後, 金具の側面によつて押し上げられる力を受け, 凹みの底の部分に生ずる引張応力 σ_t によつて破壊するものと仮定する。金具にかかる力を P_s とすると, 金具の中心を通る面で引裂こうとする力は一側面に



第 16 図 材料 E の破壊応力

つき $\sqrt{3/2} \cdot P_s$ となり, この力によつて断面に引張応力を生ずる. この際の応力分布の状況を求める代りに受圧面積として試験片の全断面積をとり (断面積 200 mm^2), 平均の引張応力を求め, 更に影響係数として凹みの底部における応力の集中と応力勾配の存在するための応力集中の有効性の組合せられたものを考える. 脆性材料の破壊において曲げ強さ σ_b は引張強さ σ_0 の約 1.5 倍とされているので¹⁾, σ_s が曲げ試験より求めた曲げ強さ σ_b の $1/1.5$ 倍となるように上記の影響係数を定めると, 断面の平均引張応力の 4.4 倍となる. そこで裂開強さとしては (1) 式のように定めることとした.

$$\sigma_s = \sqrt{3/400} \cdot P_s \times 4.4 = 0.0191 P_s \quad (1)$$

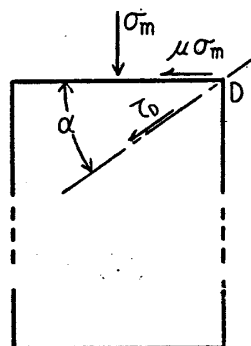
このような仮定で求めた σ_s と他の強さとの関係調べると,

$$\sigma_b/\sigma_s = 1.52, \quad \sigma_c/\sigma_s = 3.35$$

となる.

次に円柱圧縮試験においては縦方向の割れによつて破壊するものが多いと見られるので, その発生の理由を考えてみる. 第 17 図において σ_m を一様圧縮応力, μ を端面と荷重板間の摩擦係数とすれば, 試験片の横方向の伸びは端面において荷重板で拘束され, ここに $\mu\sigma_m$ の剪断応力を生じ, 従つて最大剪断応力面の傾斜角 α は端面摩擦のない場合の 45° より小となり, 最大剪断応力 τ_D

は $\sigma_m/2$ より大となる. τ_D と α は式 (2) に示される.

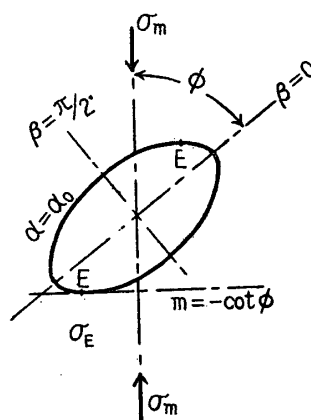


第 17 図 圧縮試験時の端面応力

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\cot^{-1} \mu}{2} \\ \tau_D &= \frac{\mu + \sqrt{1 + \mu^2}}{2} \sigma_m \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

破壊した試験片の観察によれば, $\alpha = 35^\circ \sim 40^\circ$ であつて, 式 (2) で $\mu = 0.3$ とおくと $\alpha = 37^\circ 10'$ となり大体一致する. このときの最大剪断応力 $\tau_D = 0.672 \sigma_m$ となる*.

無限平板に楕円孔 (長軸 $2a$, 短軸 $2b$) があつて長軸と角度 ϕ の方向に一樣圧縮応力 σ_m を受ける場合 (第 18 図) を考えると, 楕円孔の周辺における切線方向の応力 $\sigma_{\beta\beta}$ は式 (3) で与えられる⁴⁾.



第 18 図 傾斜楕円孔を有する板の圧縮

* なおこの部分は光弾性実験, パラフィン模型実験等によると複雑な応力状態を示し, より高い応力集中の存在する可能性が考えられる.^{2), 3)}

$$\sigma_{\beta\beta} = \frac{\sinh 2\alpha_0 + \cos 2\phi - e^{2\alpha_0} \cos 2(\phi - \beta)}{\cosh 2\alpha_0 - \cos 2\beta} \sigma_m \quad (3)$$

ただし (α, β) は楕円座標で, $\alpha = \sinh \alpha_0$ は楕円孔の周辺を表わし, $\beta = 0, \pi$ は長軸を, $\beta = \pi/2, 3\pi/2$ は短軸を表わす. 傾斜 m の切線の切点位置の β の値は

$$\tan \beta = -\frac{1}{m} \tanh \alpha_0 \quad (4)$$

となり, 圧縮力 σ_m に垂直な楕円の切線の傾斜は $m = -\cot \phi$ であるから, この値を (3), (4) 式に代入し, 楕円孔の底部 E 点の引張応力 σ_E を求めると, 楕円の形状, 傾斜角 ϕ にかかわらず

$$\sigma_E = -\sigma_m \quad (5)$$

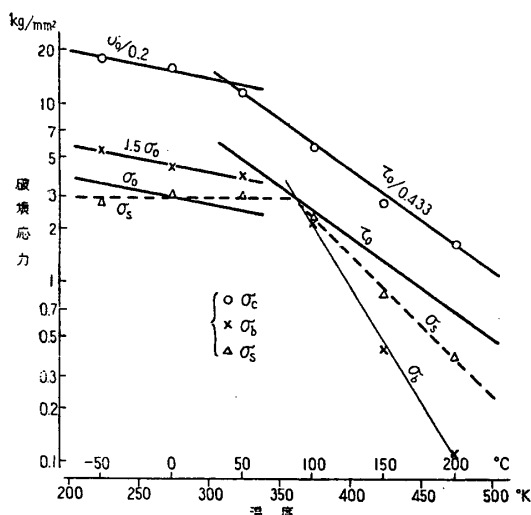
となる. なお楕円孔周囲の応力は E 点と対称点 E' の近傍のみが引張応力で, 周辺の他の部分は総て圧縮応力である.

以上のことから圧縮応力 σ_m を受けると, まず端面で肩の部分 D 点から角度 α ($35^\circ \sim 40^\circ$) の方向に $\tau_D \doteq 0.6 \sim 0.7 \sigma_m$ の剪断応力によつて小さなたがり亀裂を生じ, 楕円孔の計算から類推される通りその亀裂の最底部 E 点に σ_m に等しい引張応力 σ_E を生じそのために縦方向に割れが生じ試験片が破壊せられるものと推定される.

なおこのように考えると圧縮強さ σ_c 即ち引張強さ σ_0 となるが, 圧縮実験の結果として得られた引張強さは他の実験から得られたものと比較して非常に高い. 例えば曲げ強さが引張強さの 1.5 倍として換算した値の 3.3 倍となつている. これは E 点を通り縦方向の断面での応力分布を考えると, 応力勾配が非常に大きく, E 点を少し離れたとすぐ圧縮応力に変ることから, 応力勾配の影響のため破壊に有効な応力としては $1/3.3$ に減ずるのではないかと考えられる.

4.2 材料 F

材料 F は石炭酸樹脂の量が非常に多いために破壊強度の温度特性は材料 E とは異つている. 第 19 図に円柱圧縮試験より求めた圧縮強さ σ_c , 角棒曲げ試験より求めた曲げ強さ σ_b , 角棒の裂開試験より求めた裂開強さ σ_s を示す. なお円柱圧縮においては 50°C 以上の温度では軸線に対し



第 19 図 材料 F の破壊応力

て $\theta \doteq 30^\circ$ の傾斜面でたがり起して破壊しているので, 式 (6) により剪断強さ τ_0 を求め同図に示してある.

$$\tau_0 = \sigma_c \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta = 0.433 \sigma_c \quad (6)$$

第 19 図に見られる通り, 低温においては σ_s は温度の影響は殆んどなく, σ_c および σ_b が僅かに温度の降下と共に増大する傾向がある. 高温では σ_c , σ_s および σ_b の何れも温度の増加と共に指数函数的に減少し, σ_b が傾斜が最も大で σ_s がこれに次ぎ, σ_c が最も傾斜が少い.

今その破壊状況から考えて高温域では剪断強さ τ_0 , 低温域では引張強さ σ_0 によつて材料 F の圧縮強さ σ_c が定まるものとし, 剪断強さ τ_0 としては圧縮実験の高温域の結果から (6) 式によつて求めた値をとり, 引張強さ σ_0 としては低温域の曲げ強さの $1/1.5$ をとることとする. τ_0 及び σ_0 は温度変化に対し次のように表わすことができる.

$$\left. \begin{aligned} \tau_0 &= A e^{S/T} \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_0 &= B e^{U/T} \text{ kg/mm}^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここに A, B, S, U は常数, T は絶対温度である. 第 19 図より常数を定めると次のようになる.

$$\left. \begin{aligned} A &= 0.0097 & B &= 0.987 \\ S &= 1,950 & U &= 277 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

このようにして曲げ実験をもとにして求めた引張強さ σ_0 と低温部における圧縮強さ σ_c との関係は, 材料 E の場合と同様に低温で端面の肩の部分から斜めに $35^\circ \sim 40^\circ$ に入つた亀裂の底部の引

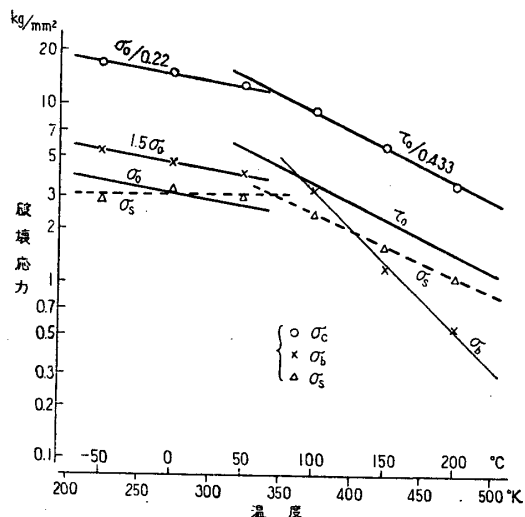
張応力によつて破壊すると仮定して比較すると、この場合は圧縮強さは引張強さの 5 倍になつている。第 19 図には圧縮強さに有効な引張応力としては σ_0 の 0.2 倍であると仮定した線 ($\sigma_0/0.2$ の線) が示してある。

低温の裂開試験より材料 E と同一の式 (1) によつて求めた σ_s と σ_0 と比較するとほぼ一致しているが、 σ_s には温度勾配が殆んどない点が相違している。これは裂開試験では圧入金具の先端の応力集中条件が温度が低くなる程試験材料の硬化のため苛酷になるための影響と考えられる。

高温部では剪断強さ τ_0 が低くなるので、曲げ、裂開の破壊は τ_0 に支配されるものと一応考えられるが、実験値 σ_b , σ_s の温度勾配は τ_0 と異なり、又破断面の状況も剪断型の破壊よりもむしろ引張型の破壊と考えられる (破断面は低温におけるものより粗粒状である)。この点については高温部ではクリープ等の塑性的変形のための応力状態の変化の影響とか、破壊型式並びにその強度の変化など更に検討を要する所である。

4.3 材料 S

材料 S は材料 F に類似しているが黒鉛の含有量が F より大であるため、強度の温度影響は F に比較して幾分緩やかである。第 20 図に圧縮強さ σ_c , 曲げ強さ σ_b , 裂開強さ σ_s および式 (6) により計算した剪断強さ τ_0 , $\sigma_b/1.5$ により算出した引張強さ σ_0 を示す。材料 S の圧縮試験において剪断破壊面のなす角 θ は $25^\circ \sim 35^\circ$ であつた



第 20 図 材料 S の破壊応力

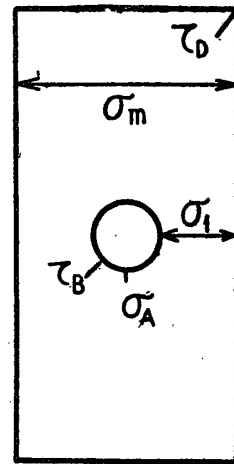
が平均値として $\theta = 30^\circ$ をとり式 (6) と同様とした。

材料 F の場合と同様に剪断強さ τ_0 及び引張強さ σ_0 の温度係数を求めると、

$$\left. \begin{aligned} \tau_0 &= A e^{U/T} \text{ kg/mm}^2 & \sigma_0 &= B e^{S/T} \\ A &= 0.0743 & B &= 1.11 \\ S &= 1,360 & U &= 253 \end{aligned} \right\} (9)$$

となり、低温部の常数は殆んど F に等しいが、高温部では温度勾配が緩かになる為、相当異つた値を示している。また低温部の円柱圧縮実験では、有効な引張応力は 0.22 倍となり、材料 F と E の中間で F に近い値を示している。

次に材料 S の有孔矩形板圧縮実験より、第 21 図に示す各部分の応力を求め⁵⁾、無孔部分平均応力 σ_m に対する係数を第 4 表に示す。



第 21 図 有孔板圧縮、応力集中部分

第 4 表 有孔板圧縮、応力集中係数

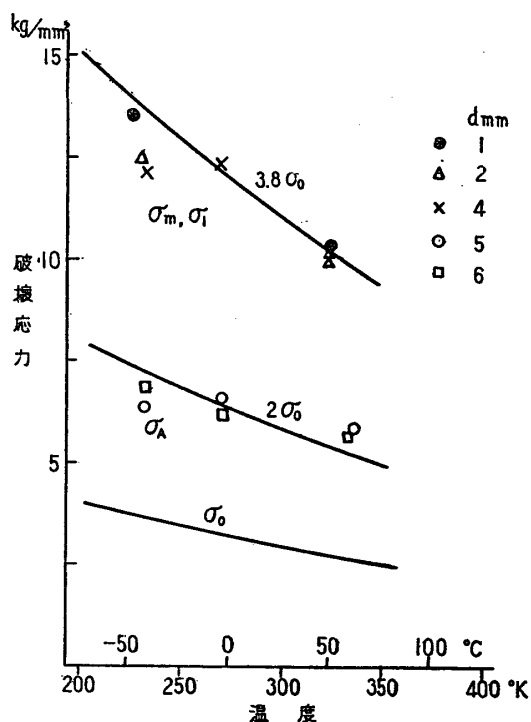
孔 径 (mm)	c_1	c_2	c_3	c_4
1	1.05	1.01	0.67	0.672
2	1.11	1.03	0.69	0.672
4	1.25	1.11	0.74	0.672
5	1.33	1.18	0.79	0.672
6	1.43	1.26	0.84	0.672

$$\sigma_1 = c_1 \sigma_m, \quad \sigma_A = c_2 \sigma_m$$

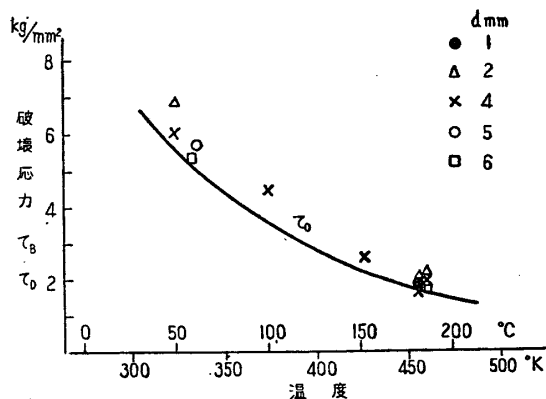
$$\tau_B = c_3 \sigma_m, \quad \tau_D = c_4 \sigma_m$$

第 22 図に低温部の試験結果から上式で求めた応力を示す。即ち δ 型破壊をしたものについては σ_A を、 α_1 型に対しては σ_m を、 β に対しては σ_1 をとつた。なお比較のため材料 S の曲げ試験か

ら得られた σ_0 を示してある。 σ_0 と σ_A との関係は $\sigma_A/\sigma_0=2$ となつている。これは円孔の中心を通る上下方向断面における応力勾配が大きい為、破壊に有効な応力が計算値の約 $1/2$ であると考えられる。この値は圧縮実験の際の端面の肩の部分からの破壊に対する有効性が 0.3 倍 (材料 E), 0.2 倍 (材料 F), 0.22 倍 (材料 S) 等であつたものに比較すると高い。これは応力勾配の影響と材料の黒鉛含有率の相違による塑性変形量の差によるものかと思われる。また σ_1 と σ_m はほぼ同じ大きさを持ち約 $3.8\sigma_0$ である。これは円柱圧縮強さが $4.55\sigma_0$ であるのに比較して約 16% 低い、これは試験片の形状の相違によるためである



第 22 図 有孔矩形板破壊応力 (低温部)



第 23 図 有孔矩形板破壊応力 (高温部)

と考えられる。

第 23 図に高温部分の試験結果を示す。図中 r 型の破壊をしたものには τ_B を、 α_2 型には τ_D を求めて印点した。なお比較のため円柱圧縮から求めた τ_0 の値を実線で示した。高温部の迂り破壊に対しては実験方法の差に拘わらず結果はよく一致している。

5. 結 言

3 種の黒鉛材料について実験を行つた結果、その特性を総合すると次の通りである。

(1) 材 料 E

純粋の黒鉛で $-50^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ の温度範囲では強度に対する温度影響は殆んど見られない。この材料では常に引張強さで破壊を生じ、曲げ強さの $1/1.5$ を引張強さ σ_0 とし、円柱圧縮の破壊については端面の肩の部分から入つた微小亀裂の底に生ずる引張応力で破壊するものと考え、その底部引張応力が $3.3\sigma_0$ に達したときに縦割れによつて破壊する。裂開試験では試験片の断面積についての平均応力の 4.4 倍が σ_0 に達したときに破壊する。

(2) 材料 S および F

高温部では剪断強さ τ_0 、低温部では引張強さ σ_0 で破壊する。 τ_0 と σ_0 は共に温度によつて変化し、温度特性は夫々 $\tau_0 = Ae^{S/T}$, $\sigma_0 = Be^{U/T}$ ($S > U$) で表わされる。

低温においては材料 E と同様の特性を示すが、裂開強さの温度勾配の少いことと、円柱圧縮強さ σ_c と引張強さ σ_0 との比 σ_c/σ_0 が材料 E の 3.3 に対して材料 S では 4.55 、材料 F では 5.0 となることは、応力勾配、応力集中および応力緩和などの影響によるものと考えられる。

高温においては剪断応力で破壊が支配されるが、曲げの場合は温度勾配も非常に大となり、破壊様式をみても単純な剪断型の破壊としては説明出来ず、更に検討を要する。

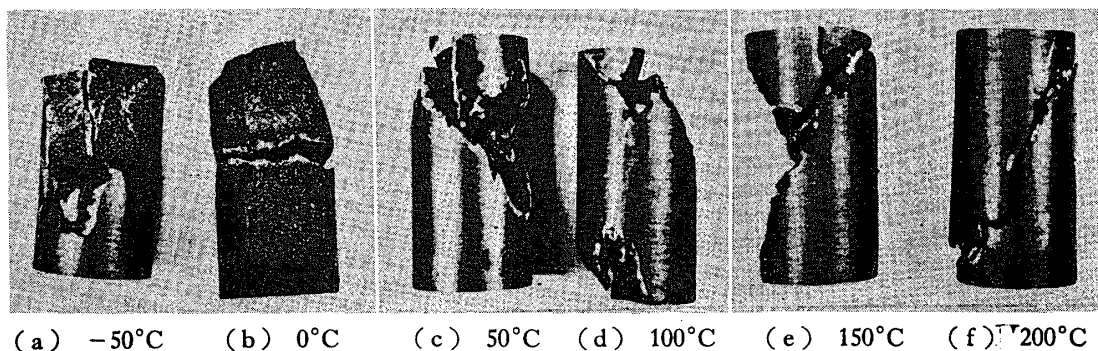
材料 S の有孔矩形板の圧縮実験結果も、低温では引張強さ σ_0 で、高温では剪断強さ τ_0 により破壊が支配されることが判つた。

以上黒鉛材料の破壊強度について、破壊様式によつて分類して温度の影響等を説明した。その組成は温度影響大なる石炭酸樹脂と、影響の小なる

黒鉛の混合したものであつて、その混合比と温度の変化によつて複雑な破壊様式を示すので、材料力学的に説明の不十分な点もあるが、本研究の結果がこの種合成材料および一般高分子材料の強度解析の今後の発展の礎石となることが出来れば幸いであると考え、実験結果を主としてここに発表する次第である。

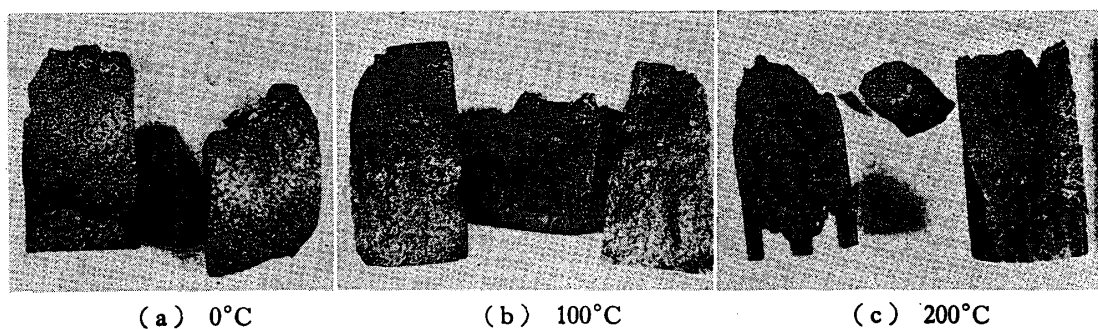
文 献

- 1) 鵜戸口英善：機械学会誌, **60**, **465** (1957), 1125.
- 2) M.M. Frocht : Photoelasticity, Vol. II, (1948), John Willy & Sons, 74.
- 3) A. Nadai : Theory of Flow and Fracture of Solids, (1950), McGraw-Hill, 332.
- 4) C. E. Inglis : Trans. I. N. A., **55**. **1** (1913), 219.
- 5) R. C. J. Howland and A.C. Stevenson : Phil. Trans., **A**, **229** (1930), 49.



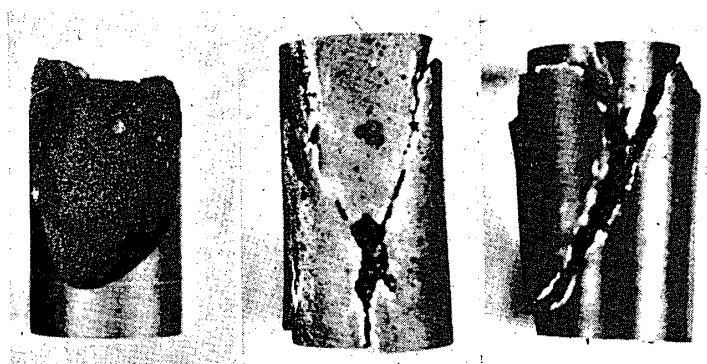
(a) -50°C (b) 0°C (c) 50°C (d) 100°C (e) 150°C (f) 200°C

第 4 図 材料 S の円柱圧縮試験片破壊状況



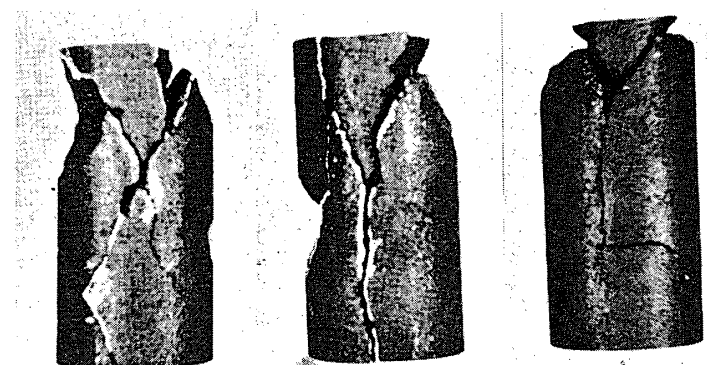
(a) 0°C (b) 100°C (c) 200°C

第 5 図 材料 S の円柱圧縮試験片破断面状況



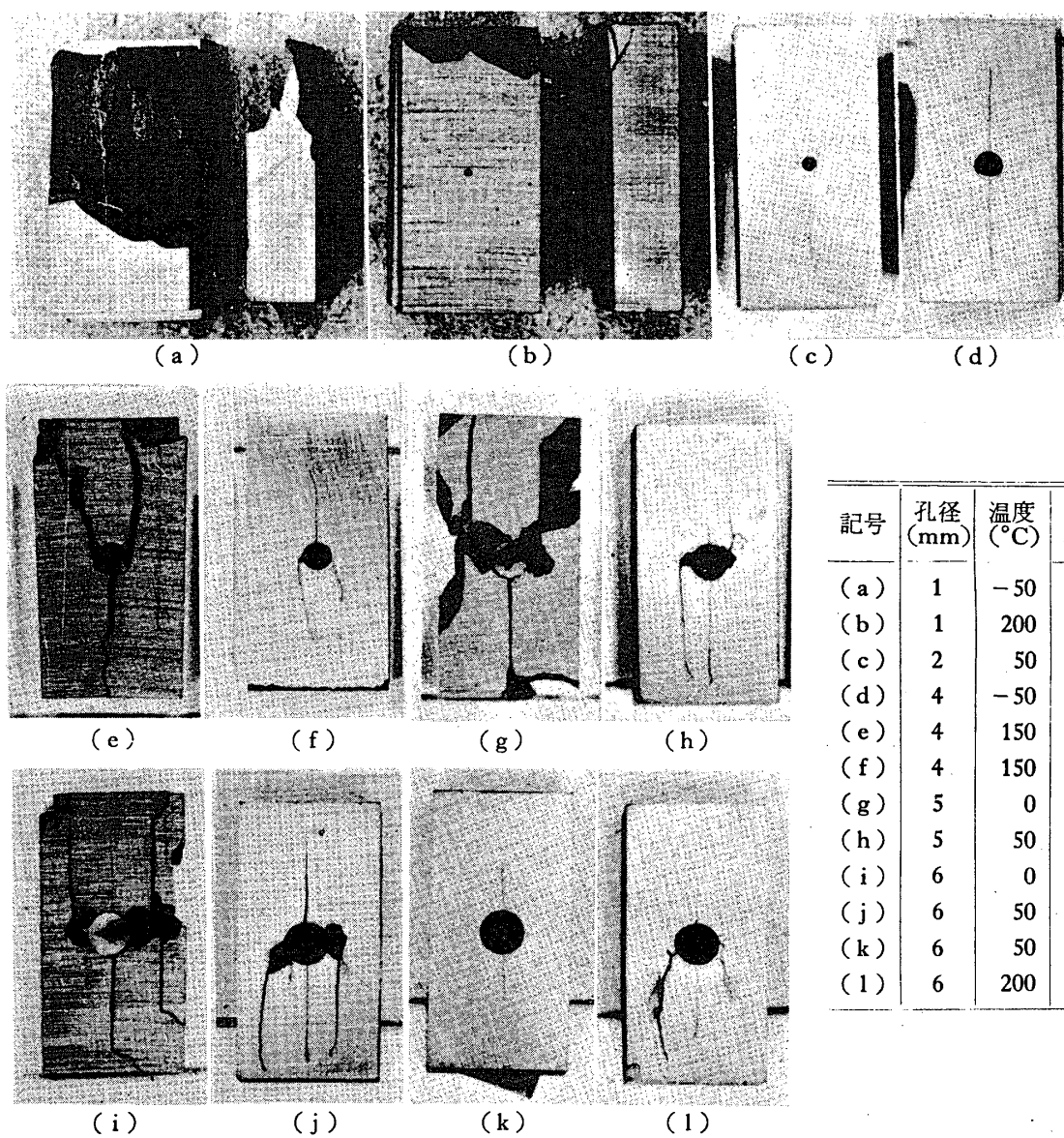
(a) 0°C (b) 100°C (c) 200°C

第 6 図 材料 F の円柱圧縮試験片破壊状況

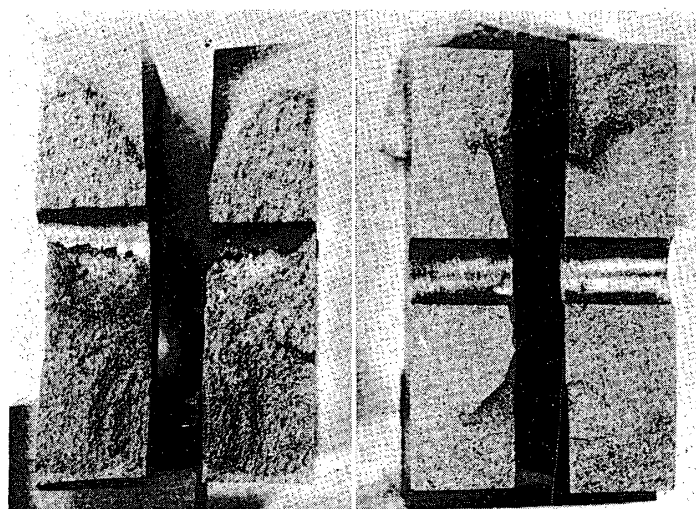


(a) -50°C (b) 100°C (c) 200°C

第 7 図 材料 E の円柱圧縮試験片破壊状況



第 11 図 材料 S の有孔矩形板圧縮破壊状況

(a) 6 mm, 200°C, γ 型 (b) 6 mm, -50°C, δ 型

第 12 図 材料 S の有孔矩形板圧縮破断面状況