

粘弾性材料の初期クラック伝播挙動

小林 昭・大谷 信男

Initial Crack Propagation Behavior in a Viscoelastic Solid

By

Akira KOBAYASHI and Nobuo OHTANI

概 要

粘弾性材料の初期クラック伝播挙動を、新たに開発した改良速度ゲージ法によって解明した結果、粘弾性材料の動的クラック伝播は、まず外的応力の増大を必要とする延性破壊ではじまり、次いで応力値一定の伝播速度の早い致命的な脆性破壊が続くこと、また、この延性破壊域は温度上昇とともに減少すること、さらに、初期クラック伝播速度も温度上昇に伴っておそくなること等が分り、加温された状態で使用されている現用ジェット機の風防、窓ガラス等の粘弾性材料への有用なデータを得た。

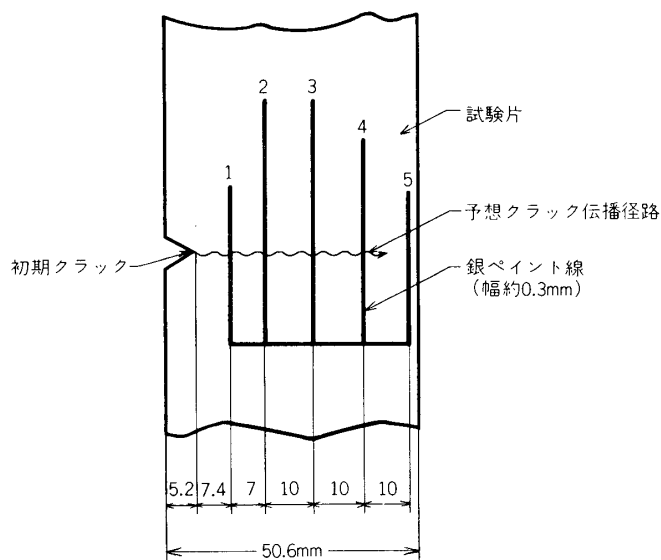
1. 序 言

粘弾性材料の動的クラック伝播についてのこれまでの研究は、終極速度ないし定常クラック伝播速度についてのものであり[1, 2], クラック伝播発生直後の所謂、初期クラック伝播挙動については一つには短時間内の精密測定技術がとれないかねる向きもあって、全く解明されていない状態である。著者らは、かねてよりこの初期クラック伝播挙動についてその解明に興味を有していたが、ようやく短時間内の急激変化現象に対処し得る測定技術の開発に成功し、実験的研究を進めた結果、期待していたように注目すべき新しい事実を見出したので以下にその経緯について報告する。なお、対象とした粘弾性材料には航空機用風防、窓ガラス等に使用されるアクリル樹脂(PMMA)を用いた。

2. 改良速度ゲージ手法(Modified Velocity Gage Technique)

一般に、動的クラック伝播現象の計測に用いられる手法にはインピーダンス(Impedance)法、超音波(Ultrasonic)法、高速写真(High-Speed Photography)法、速度ゲージ(Velocity Gage)法などがあり、これまでの主な測定技術を形成している[3]。これらはそれぞれに得失があるが、速度ゲージ法は比較的実績もあり、著者らも数年にわたり利用しているので、今回このような短時間内の精密測定手法への改良を、この速度ゲージ法に試みた。

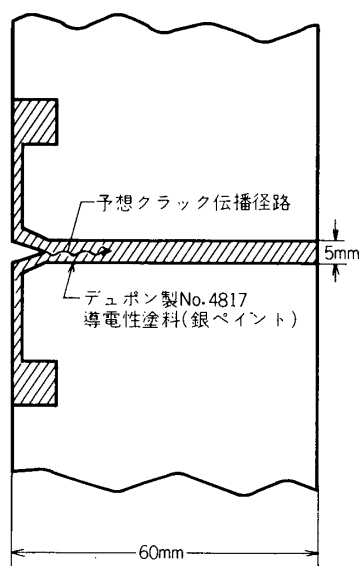
これまでの速度ゲージ法は、第1図のように進行クラックの予想径路に直角に導電性塗料、すなわち銀ペイント(通常、du Pont製 No.4817 Conductive Silver Coating Material)を予め、きめた間隔で塗り、クラックの伝播進行に伴ってこの銀ペイント線が切断されると、電気



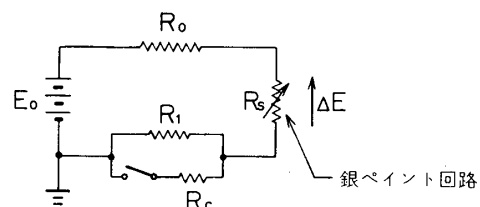
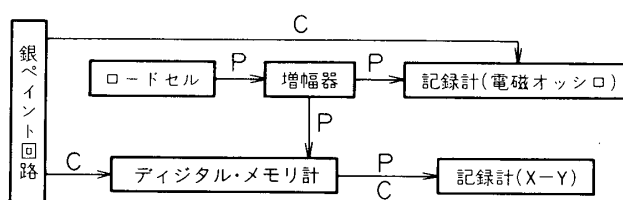
第1図 従来の速度ゲージ配置図

回路に抵抗変化を生じて、ブラウン管オシロスコープ上に波形を画き、この銀ペイント線の切断時刻が記録されるから2点間の銀ペイント線の切断時刻から、この2点間の平均速度を求めていた。勿論、銀ペイント線間隔を密にすればそれだけ細かいクラック伝播速度が求められるが、現実には銀ペイント線自体の幅が略々 0.3 mm は必ずあり、したがって銀ペイント線間隔を密にして急激変化を生じる初期クラック伝播挙動を追跡することには限度があると云わざるを得ない。すなわち、このような不連続計測では不都合であり、連続的計測が可能な速度ゲージを考える必要がある。

そこで、種々考案の末、第2図のような銀ペイント線の塗布を試験片上に行ない、第3図に示す回路を形成して、第4図のクラック伝播時の銀ペイント線切断による電圧変化 $\Delta E \sim$ クラック長さ C の相関関係を得た。この回路により、クラック伝播開始直後からのクラック伝播速度 \dot{C} および対応する破断応力 σ が連続的に計測できる。第3図において、増幅器は共和電業製動歪測定用増幅器DM-6J、記録計(電磁オシロ)は横河電機製Photocorder EMO-1、デジタル・メモリ計は理研電子製Transient Converter TCED-1000、記録計(X-Y)は理研電子製X-Y Recorder F-43Pをそれぞれ使用した。第3図の銀ペイント線回路より、クラック伝播速度を計測する系統が2本(C で表わす)出されているのは、クラック伝播発生の初期での、極めておそいクラック成長がある場合にはPhotocorder(電磁オシロ)により、クラック伝播速度が早い場合には応答性の高いTransient Converter(デジタル・メモリ計)により、それぞれ計測できるようになっているためである。このように、クラック伝播速度計測を第2図のような連続的速度ゲージを利用したことで、緩急いずれにも充分対処出来るように2系統の計測・記録系統を平行に設置したことが、急激変化現象の観測を可能ならしめたと云えよう。

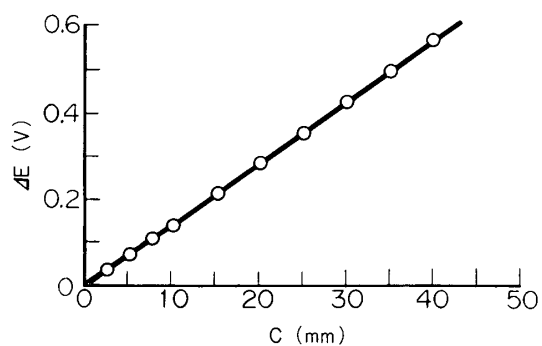


第2図 改良速度ゲージ配置図



C: クラック
P: 荷重

第3図 改良速度ゲージ回路ブロック図



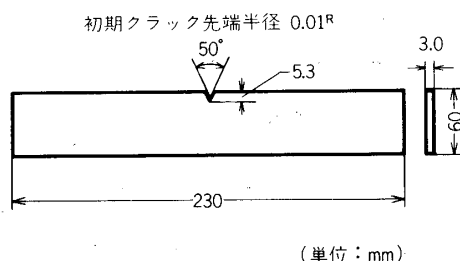
第4図 改良速度ゲージ回路電圧変化較正図

3. 負 荷 装 置

動的クラック伝播を発生させるために外部から試験片に力を加える必要があるため、インストロン型万能試験機(東洋ボールドウィン製UTM-1)を用いて一定クロスヘッド速度1mm/分で負荷した。相当する歪速度 $\dot{\epsilon}$ は 1.67×10^{-4} /秒である。なお、負荷測定は附属のロードセルによった。

4. 試 験 片

第5図に示す寸法のPMMA(Polymethyl methacrylate)試験片を使用した。初期クラック先端半径は0.01mm, 初期クラック角度 50° , 初期クラック長さ5.3mmである。チャック間距離は100mmとした。



第5図 PMMA試験片形状

5. 高 温 環 境

航空機用風防などは低温脆性, bird impact による破壊などを防ぐため, 加温されているのが普通であるので, 室温(22°C)のほかにも高温環境として 45°C および 53°C を熱風炉(ブラウン製)により設定した。高温環境での試験は, 試験片を熱風流中に入れて15分ないし20分間経た後, 行なった。なお, この熱風流の流速はおそく動的クラック伝播への悪影響は生じなかった。

6. 実 験 結 果 と 検 討

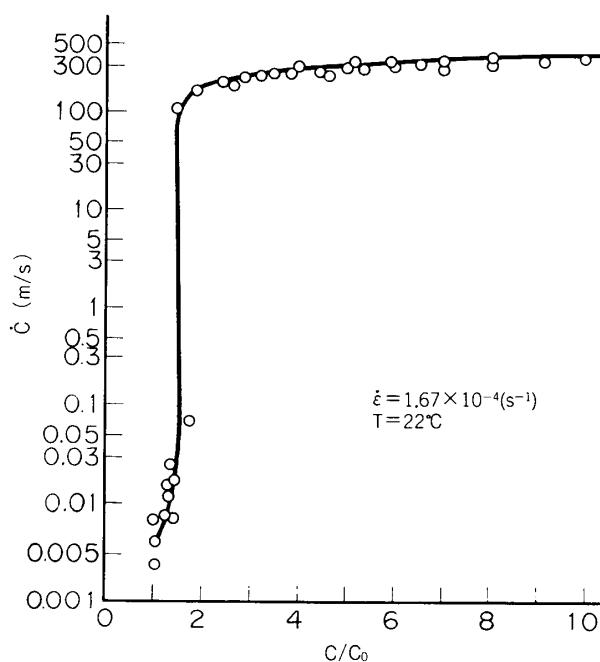
前述の改良速度ゲージ手法により, 22°C , 45°C および 53°C における動的クラック伝播速度 \dot{C} とクラック伝播中の破断応力 σ を測定した。すなわち, 第6~8図は動的クラック伝播速度 \dot{C} を無次元クラック長さ C/C_0 に対しプロットしたものであり, 第9~11図はクラック伝播中の破断応力 σ をやはり無次元クラック長さ C/C_0 について整理したものである。また, 第12~14図には特に初期クラック伝播挙動でのクラック伝播速度 \dot{C} と破断応力 σ との関係を調べるために, 無次元クラック長さ C/C_0 についてプロットを行なった。第1表に, これらの実験条件, 実験結果等について整理してかかげる。

まず第6~8図を見ると, 動的クラック伝播速度 \dot{C} はいづれの温度においてもクラック・スタートの初期には極めておそい値を示して所謂slow crack growthの領域が存在しており,

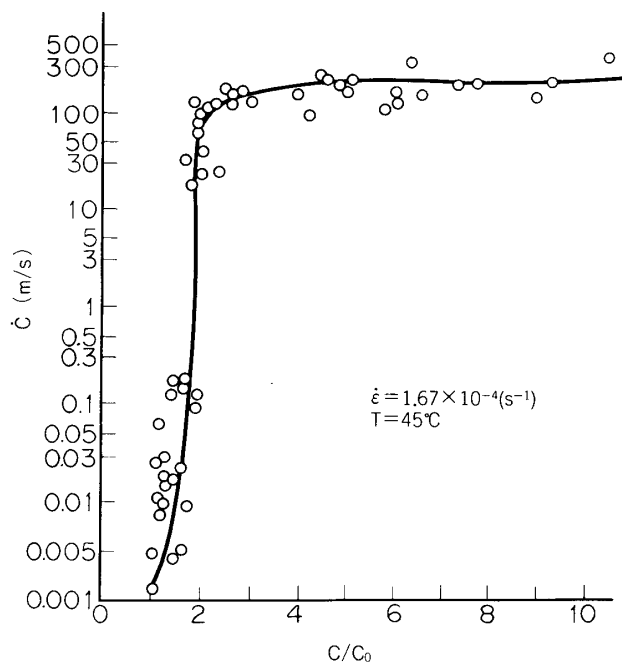
温度が上昇するにつれてその立ちあがりがおそくなって、このslow crack growth領域が広がっており、また漸近する終極速度も低くなっていることが認められる。このことは、明らかに温度上昇による粘弾性材料内の粘性効果の増大によって散逸エネルギーが増え、進行クラックを伝播させるエネルギーが減ることを意味するものと解される。特に22°Cの場合と53°Cの場合とを比べて見れば、この効果ははっきりと分る。なお、45°Cおよび53°Cの時の銀ペイント線切断においても、高温軟化によるtime lagは認められなかった。破断面よ

第1表 実験条件, 実験結果等

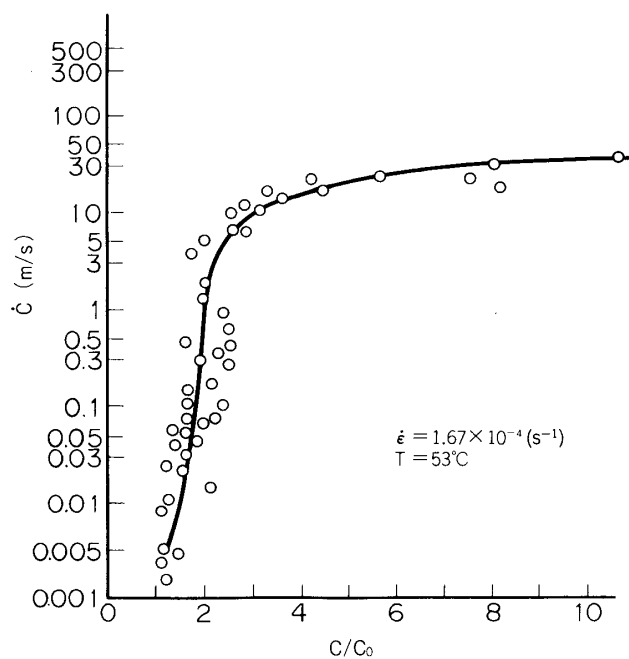
温度	歪速度 $\dot{\epsilon}$	試験片の数	クラック伝播速度 \dot{C}	破断応力 σ	初期クラック成長 $\dot{C} \sim \sigma \sim C/C_0$
22°C	1.67×10^{-4} /秒	6	第6図	第9図	第12図
45°C	1.67×10^{-4} /秒	6	第7図	第10図	第13図
53°C	1.67×10^{-4} /秒	7	第8図	第11図	第14図



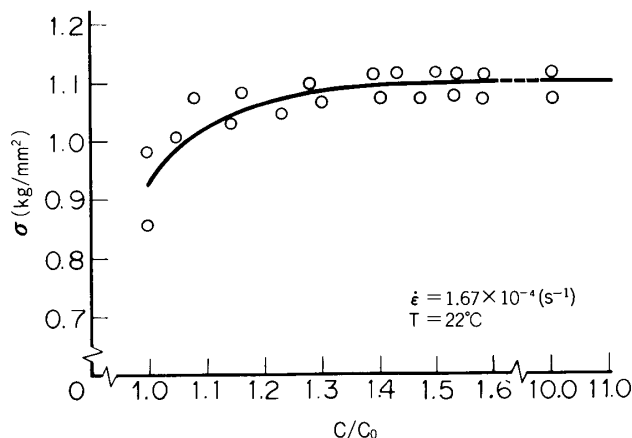
第6図 動的クラック伝播速度 \dot{C} と無次元クラック長さ C/C_0 との関係(22°C)



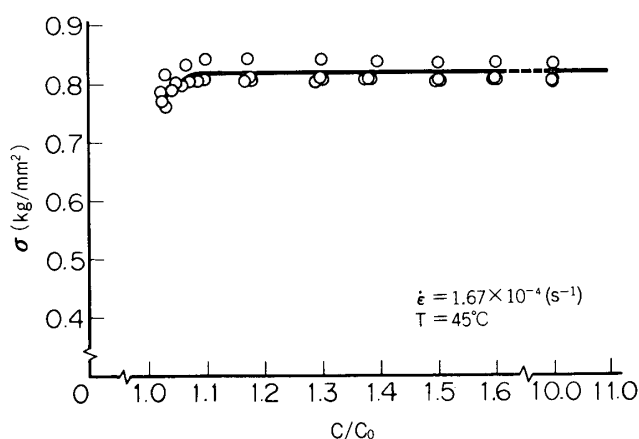
第7図 動的クラック伝播速度 \dot{C} と無次元クラック長さ C/C_0 との関係(45°C)



第8図 動的クラック伝播速度 \dot{C} と無次元クラック長さ C/C_0 との関係(53°C)



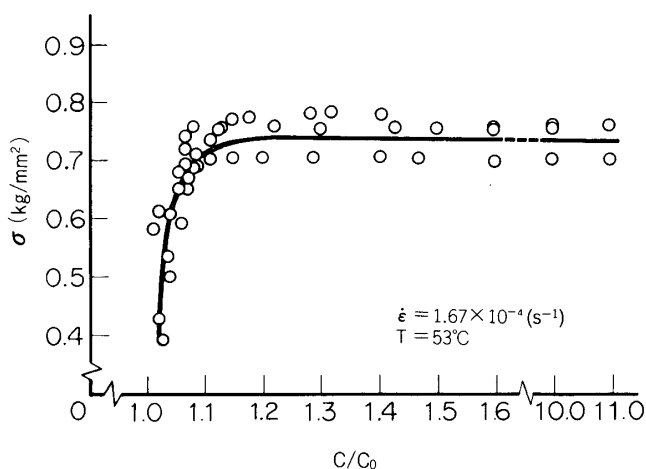
第9図 クラック伝播中の破断応力 σ と無次元クラック長さ C/C_0 との関係(22°C)



第10図 クラック伝播中の破断応力 σ と無次元クラック長さ C/C_0 との関係(45°C)

り識別した結果も、これを肯定するものである。

第9～11図のクラック伝播中の破断応力 σ の変化については、温度が上昇すれば当然のことながら破断応力は低下するが、各温度における一定応力値になるまでに進むクラックの長さは、温度が上昇するにつれて短くなっている点が注目される。一般に延性クラック伝播では、外的応力が增大しなければクラックは進行しないが、脆性クラック伝播では、外的応力は増大せず一定のままでクラック伝播が進行する。第9～11図のいずれにおいても、クラック・スタートの初期には応力の増大がクラック進行に伴っているので、この意味で延性クラック伝播であり、完全脆性弾性体がクラック伝播中は応力一定であるのに対し、PMMAのような本質的に粘弾性材料であるものは応力の増加がクラック・スタート直後には必要であ

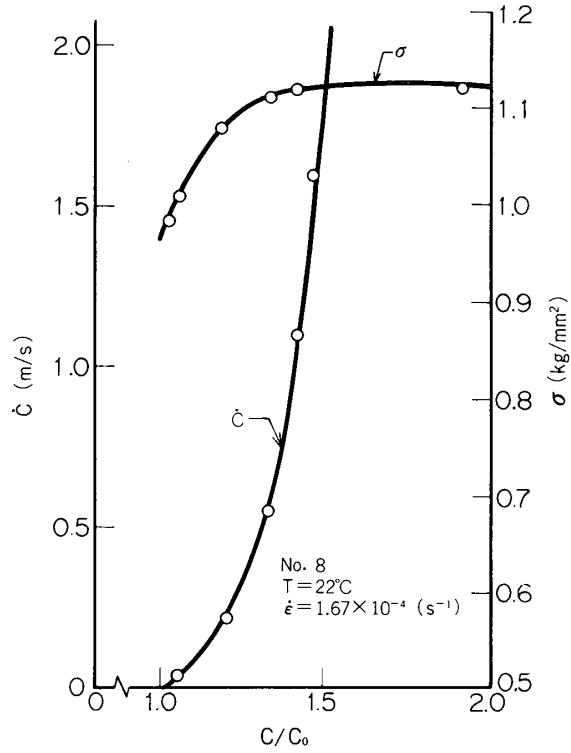


第11図 クラック伝播中の破断応力 σ と無次元クラック長さ C/C_0 との関係(53°C)

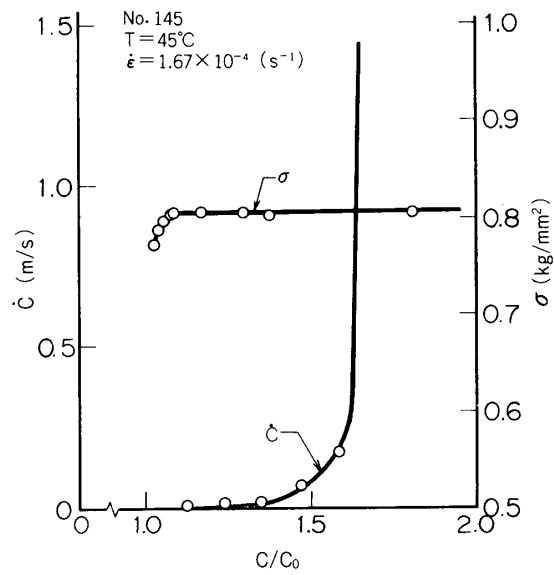
り、この延性クラック伝播の後に応力一定の脆性クラック伝播が追従するものと云える。

第12～14図は初期クラック伝播挙動での、動的クラック伝播速度 \dot{C} とそのクラック伝播中の破断応力 σ との相関性を各温度について示したものであるが、各温度での他の試験片も同様の傾向を有している。まず第12図の22°Cの場合は、 $C/C_0=1.5$ 位から破断応力 $\sigma=1.12\text{kg/mm}^2$ の一定値に到達し、一方、クラック伝播速度 \dot{C} は最初から加速度的に増加して、 $C/C_0=1.5$ までには充分早くなって居り、これ以後所謂、応力一定かつクラック伝播速度の早い、典型的な脆性破壊領域に入っている。第13図は45°Cの場合であるが、 $C/C_0=1.1$ あたりから $\sigma=0.805\text{kg/mm}^2$ の一定破断応力値を示し、 \dot{C} は $C/C_0=1.62$ 程度から急速に増大している。前述したように、 $C/C_0=1.1$ ですでに応力一定の脆性破壊域に入っているが、 \dot{C} は $C/C_0=1.62$ 近辺までは極めておそく遅々とした進行状態である。第14図の53°Cでの結果も45°Cの場合と似ており、 $C/C_0=1.09$ あたりから $\sigma=0.76\text{kg/mm}^2$ の一定値を示し、 \dot{C} は $C/C_0=1.7$ 附近から早くなっている。すなわち、高温になると、22°Cの場合に比べてより早く応力一定の脆性破壊領域に入るが、この脆性破壊領域に入っても、最初はクラック伝播速度がきわめておそい現象が存在している。このことは、切欠き等のstress raiserが材料内にあって、外的応力の増加によってクラックが成長・進行した時、高温時の方が短いクラックの進行で、それ以上応力の増加を必要としない脆性破壊領域に入り、しかも最初はそのクラック伝播速度がきわめておそいために気づかずにいると、間もなくクラック伝播速度が加速度的に増大して、致命的破壊に至ることを意味している。現用ジェット機の風防などに用いられている、このようなアクリル樹脂は通常50°C前後に加温されている。これはbird impact(鳥との衝突)や高空飛行時での低温脆性から保護するためであるが、本研究の結果による加温時の上述のようなクラック伝播速度のおそい初期の脆性破壊挙動は、一旦、クラックが風防などに入ると、たとえ目視等により当初から気づいていても、はじめはその速度がおそいので対策をなござりにしていると、やがてクラックがその伝播速度を加速してたちまち全体の破壊につながる危険があることになり、この観点から

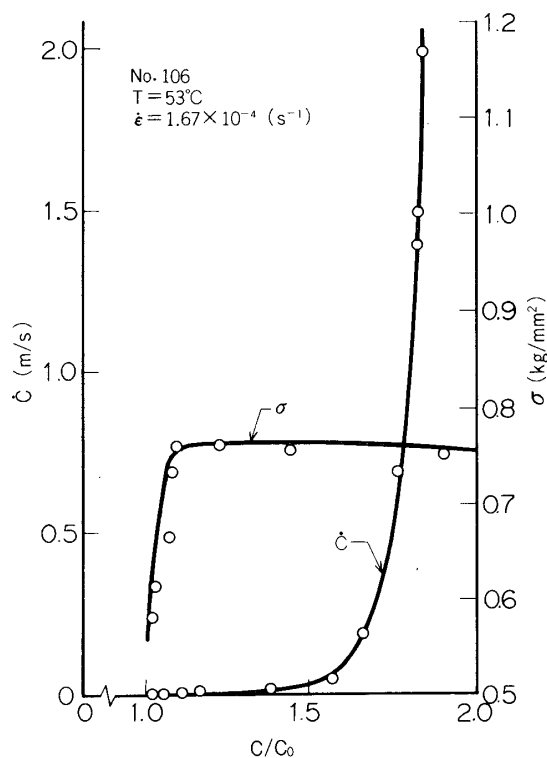
の注意が必要と思われる。



第12図 初期クラック成長における動的クラック伝播速度 \dot{C} と破断応力 σ との相関性(22°C)



第13図 初期クラック成長における動的クラック伝播速度 \dot{C} と破断応力 σ との相関性(45°C)



第14図 初期クラック成長における動的クラック伝播速度 \dot{C} と破断応力 σ との相関性(53°C)

7. 結 論

これまで解明されていなかった、粘弾性体の動的クラック伝播の初期挙動を、改良速度ゲージ法を開発して調べた。その結果、PMMAのような本質的に粘弾性材料であるものには、動的クラック伝播開始に外的応力の増大を必要とする延性破壊がまず発生し、次いで応力値一定の脆性破壊がつづくこと、温度が上昇するにつれて、この延性破壊域が減少すること、かつ初期クラック伝播速度も温度が上るとおそくなっていくこと等、実用上、有益な興味ある結果を得た。

謝 辞

東京大学宇宙航空研究所 河田幸三教授の御激励に感謝するものである。同所小林研究室の勝田泰弘君、奥山守男君、井出守君および宗村昌幸君の実験への協力に謝意を表すものである。

なお、本研究の一部分は、文部省科学研究費補助金によって行なわれたことを附記する。

1975年10月7日 材料部

参 考 文 献

- [1] Cotterell, "Velocity Effects in Fracture Propagation", Appl. Materials Res., p. 227 (Oct. 1965)
- [2] A. Kobayashi, N. Ohtani and T. Sato, "Phenomenological Aspects of Viscoelastic Crack Propagation", J. Appl Polymer Sci., p. 1625 (June 1974).
その他, 日本航空宇宙学会誌, p. 153 (1973年3月); 東大宇宙航空研究所報告, p. 738 (1970年9月), など
- [3] H. Liebowitz(ed.), "Fracture", Vol. II, Academic Press, p. 545 (1968)