

歪速度に依存する動的クラック伝播の 光弾性手法による実験的研究

小林 昭・佐藤 正・大谷 信 男

Experimental Study on Strain-Rate-Dependent Crack Propagation through Photoelastic Techniques

By

Akira KOBAYASHI, Tadashi SATO and Nobuo OHTANI

概 要

粘弾性体の動的クラック伝播速度の、外的歪速度依存性を解明する一つの方法として、超高速カメラによる動光弾性手法を、エポキシについて試み、硬化状態が安定している高温硬化型エポキシについては、動的クラック伝播時の光弾性等色線縞次数分布が、外的歪速度に顕著に依存していることが明らかにされ、特に三次元的表示によって、高歪速度場合および準静的場合との差異がはっきりと示され、縞次数分布と外的歪速度との相関関係が認められた。このことは、動的クラック伝播時の材料に生じる主応力差が、外的歪速度によって異なることを意味して居り、動的クラック伝播を支配する散逸エネルギーに差を生じることを示し、動的クラック伝播速度の歪速度依存性の、一つの定性的解釈を与えるものと考えられる。又、主として硬化条件に起因する材料の安定状態も、このような歪速度依存性現象に影響を与えるものと思われる。

1. 序 言

粘弾性材料に発生する動的クラック伝播についての、動光弾性手法による実験的研究としては、allyl carbonate (CR-39) について Wells-Post [1] が行なっているものが有名であり、彼等は Crazz-Schardin 型の multiple spark camera を用いて、静的場合 (static: この場合は単なる saw-cut) と進行クラック場合とについて、夫々、動光弾性写真を撮影して、両者間の光弾性等色線縞次数分布 (N 分布) は殆ど差異を示さないと結論しているが、この場合の進行クラックを生じさせる外的負荷の歪速度はおそく、準静的場合と考えられる。

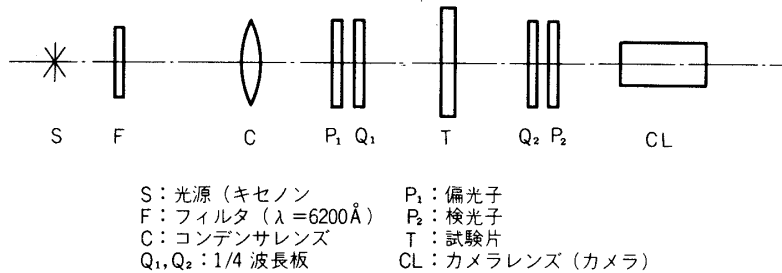
しかしながら、著者らのこれまでの研究 [2], [3], によれば、外的歪速度が増加すれば、PMMA (polymethyl methacrylate: ポリメチルメタクリレート), エポキシなどの粘弾性材料では、動的クラック伝播速度が増加し、エポキシを対象とする超高速カメラによる動光弾性手法によって、進行クラック先端近傍の光弾性等色線縞次数分布 (N 分布) が、外的歪速度に依存して変化すること、などが分っているが、その後エポキシについて、更に実験を重ね考察を加えた結果を報告する。

2. 実験手法

実験手法については、既に文献[2]に於て詳述したので以下に簡単に記す。

2.1 光弾性実験装置

通常的光弾性実験装置を用い、使用光源はキセノンで波長 6200\AA である。第1図にその配置を示す。後述の準静的および高歪速度負荷装置は、夫々トリガー回路と連結して、第1図内のT位置に入り、試験片に負荷を与え、又、同じく後述の超高速カメラはCL位置に入って動的クラック伝播を撮影する。



第1図 光弾性実験装置

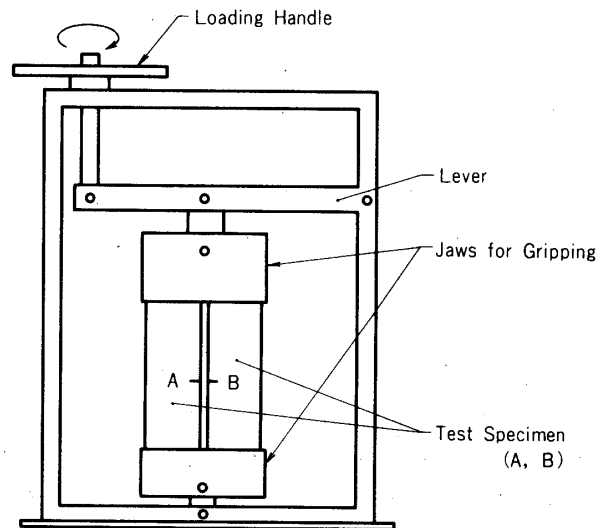
2.2 超高速カメラ

東大工学部附属総合試験所高速度カメラ室のベックマン192型超高速こまどりカメラを用いた。使用こまどり速度は10万こま/sec~19万こま/secである。このカメラの光源は、作動後、 $80\mu\text{sec}$ 程度の初期過渡状態を有するので、後述のようなトリガー回路(第3図および第5図)を考案して、定常状態になった後、撮影を行なった。尚、この実験条件では、有効撮影時間はおよそ $200\mu\text{sec}$ である。

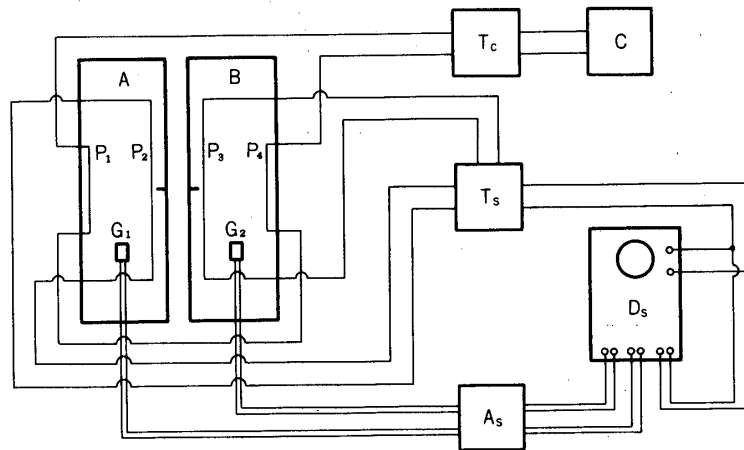
2.3 準静的負荷装置およびトリガー回路

第2図のような負荷装置を用い、

A, Bの全く同一寸法試験片を装着してLoading Handleを極力、一定速度でまわすことにより準静的に負荷する。この折の歪速度は、凡そ $5 \times 10^{-4}/\text{sec}$ である。A, Bいずれかに、先に必ずクラックが進行するから、先にクラックが走った方がダミー試験片となって、第3図に示されるトリガー回路を作動させ、カメラ光源を起動し、不安定状態(前述: ほぼ $80\mu\text{sec}$)を通過した後、残る試験片(本番の試験片になる)におけるクラック伝播状況が光弾性的に撮影される。尚、A, Bいずれかが



第2図 準静的負荷装置



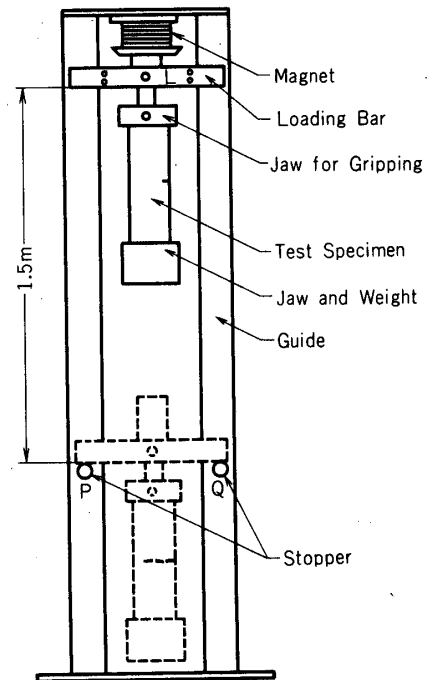
- A, B : Specimen
- As : Strain Gage Amplifier
- C : Camera Light Source
- Ds : Dual Beam Synchroscope
- G1, G2 : Strain Gage
- P1, P4 : Conductive Coating Wire for Camera Triggering
- P2, P3 : Conductive Coating Wire for Strain Gage Triggering
- Tc : Camera Light Source Trigger Circuit
- Ts : Strain Gage Trigger Circuit

第3図 準静的負荷装置用トリガー回路

先に切断した場合には、曲げ効果が入るおそれがあるが、光弾性的に調べた結果、その心配のないことが分っている。

2.4 高歪速度負荷装置およびトリガー回路

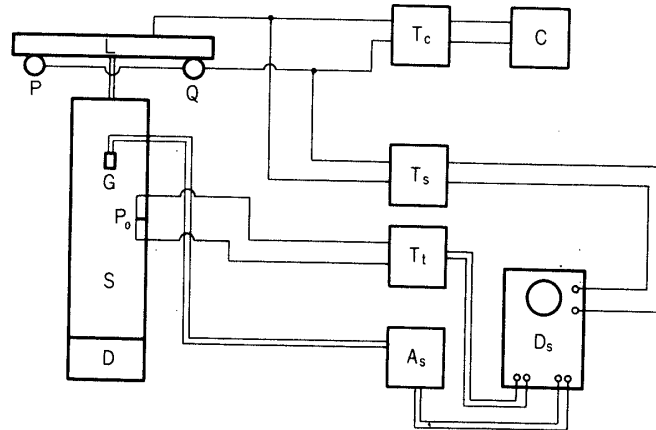
高歪速度場合を実現する手法はいくつかあるが、ここでは落下重錘 (falling weight) によるものによった。即ち、第4図のような装置を研究室に於て試作したが、重錘は2 kgで上部のMagnetの開閉により1.5 m落下して、Stopper P, QにLoading Barがぶつかる。この際、第5図のトリガー回路に示されるように、カメラ光源はP又はQ (勿論、同時でもよい) での接触によって起動され、引続いて試験片に重錘が負荷してクラックを進行させるまでには、光源が定常状態になっている。この際の歪速度は、25.6/sec~37.9/secである。



第4図 高歪速度負荷装置

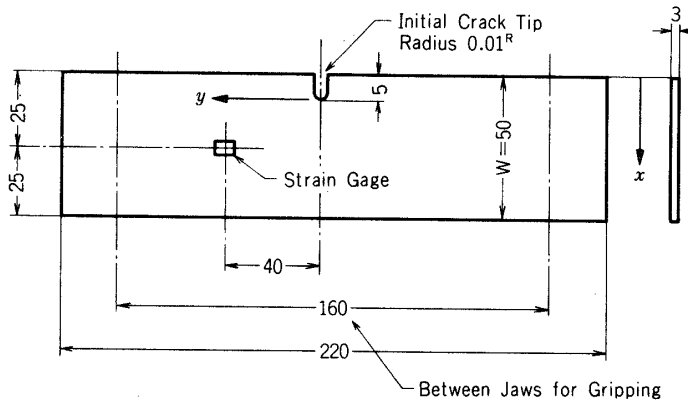
3. 試験片

光弾性感度が高くて、この種の動光弾性実験に適するエポキシ (Epoxy) 樹脂を使用し、第6図のような試験片を製作した。尚、試験片の硬化条



- As : Strain Gage Amplifier
- C : Camera Light Source
- D : Weight
- Ds : Dual Beam Synchroscope
- G : Strain Gage
- L : Loading Bar
- P, Q : Stopper
- Po : Conductive Wire for Crack Initiation Checking
- Tc : Camera Light Source Trigger Circuit
- Ts : Strain Gage Trigger Circuit
- Tt : Crack Initiation Checking Circuit
- S : Specimen

第5図 高歪速度負荷装置用トリガー回路



第6図 試験片形状

件を変えたものを2種類用意し、硬化条件による影響についても比較を行なった。

第1表に硬化条件、成分、ヤング係数 E および密度 ρ を記す。尚、試験片には歪ゲージ（共和電業製 KFC-2-500-C1-11，ゲージ長 2 mm，500 オーム）を貼り、歪速度 $\dot{\epsilon}$ の検出にも用いた。

4. 実験結果

超高速カメラによる動光弾性撮影を行ない、若干の失敗例を除いて第2表に示すように、

第1表 エポキシ硬化条件, 成分, 力学特性

	常温硬化型	高温硬化型
メーカー名	フソー(株)	理研計器(株)
成分(重量比)	アラルダイトB 100 ハードナー HT 901 30	アラルダイトD, CY-230 100 ハードナー HY-956 20
硬化条件	常温注型後, 1か月程度で安定, または, 90~95℃でアニール後, 10~20時間程度で安定	注型後 125~130℃で4~5h→型はずす→130℃に昇温→3~4℃/hで徐冷→70℃からは自然放冷→ゼロハンを取りアニール→125℃で1h保持→3~4℃/hで徐冷
E (kg/mm ²) ($\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-4}/s$) における値)	394	422
ρ (g/cm ³)	1.270	1.297

第2表 実験条件

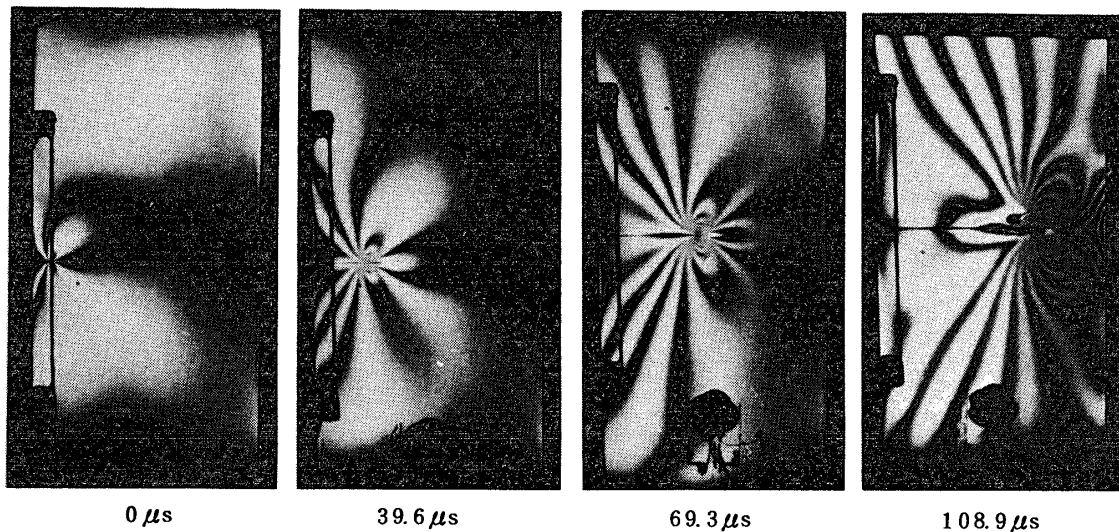
試験片番号	硬化条件	実測歪速度 (1/sec)	こまどり速度 (コマ/sec)
845	常温硬化型	25.6	190,000
848	常温硬化型	24.6	100,000
849	高温硬化型	37.9	100,000
850	高温硬化型	5×10^{-4}	100,000
851	高温硬化型	5×10^{-4}	100,000
852	常温硬化型	5×10^{-4}	100,000
853	常温硬化型	5×10^{-4}	100,000

結局計7本の試験片について, 夫々, 示された硬化条件, 歪速度, こまどり速度での光弾性等色線縞次数分布 N を表わす光弾性写真を得た。第7図にその光弾性写真の一例をかかげる。即ち, 高温硬化型エポキシについては3本, 常温硬化型エポキシについては4本を当て, 高温硬化型のうち, 1本を高歪速度負荷, 2本を準静的負荷で行ない, 又, 常温硬化型では2本を高歪速度負荷, 2本を準静的負荷に用いた。これらデータの整理は, 通常, 二次元的に縞次数 N と各座標系について行なわれるが, ここでは三次元的に, $N \sim y/W$ および $N \sim x/W$ (W =試験片幅)を求めることを行なった。

以下に夫々の代表例の結果を記す。尚以下にかかげる例以外についても, 硬化条件, 歪速度などに応じて, ほぼ同様な傾向を示している。

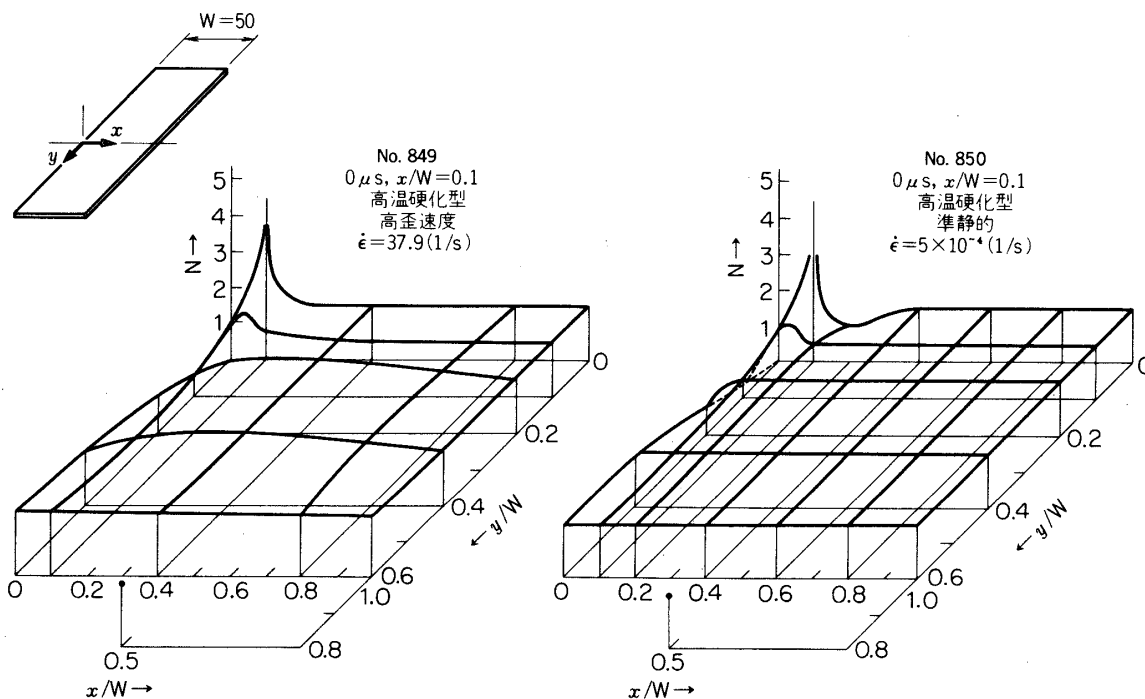
4.1 高温硬化型試験片

№849 (高歪速度場合: $\dot{\epsilon} = 37.9/sec$) および№850 (準静的場合: $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-4}/sec$) について, 進行クラック先端が将にスタートする時, 即ち $x/W = 0.1$ (両試験片ともに $0 \mu s$)

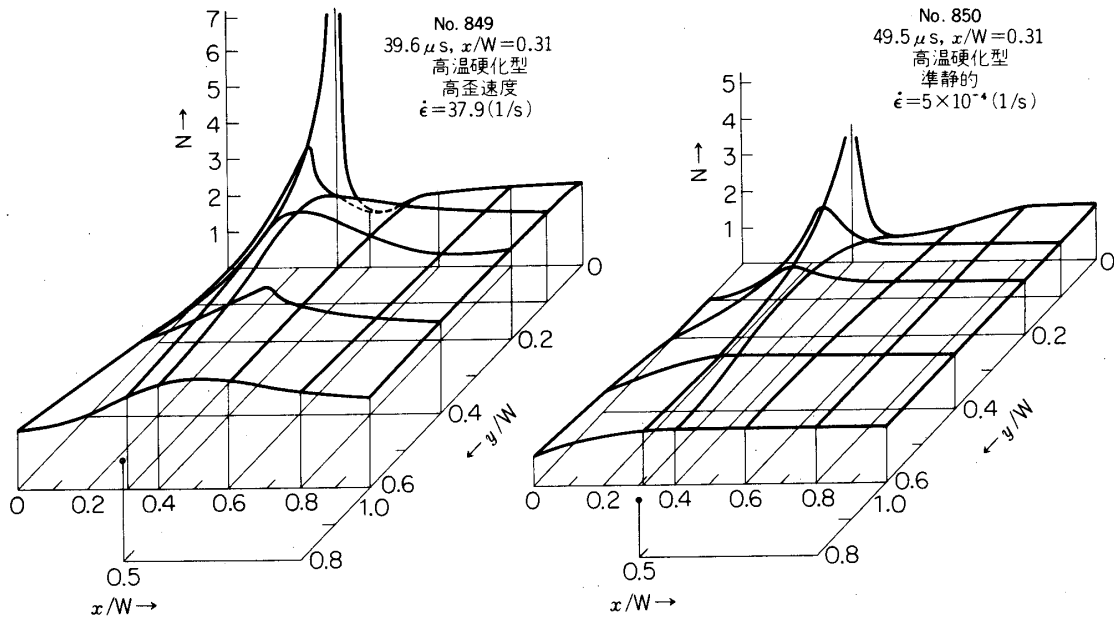


第7図 光弾性写真の一例

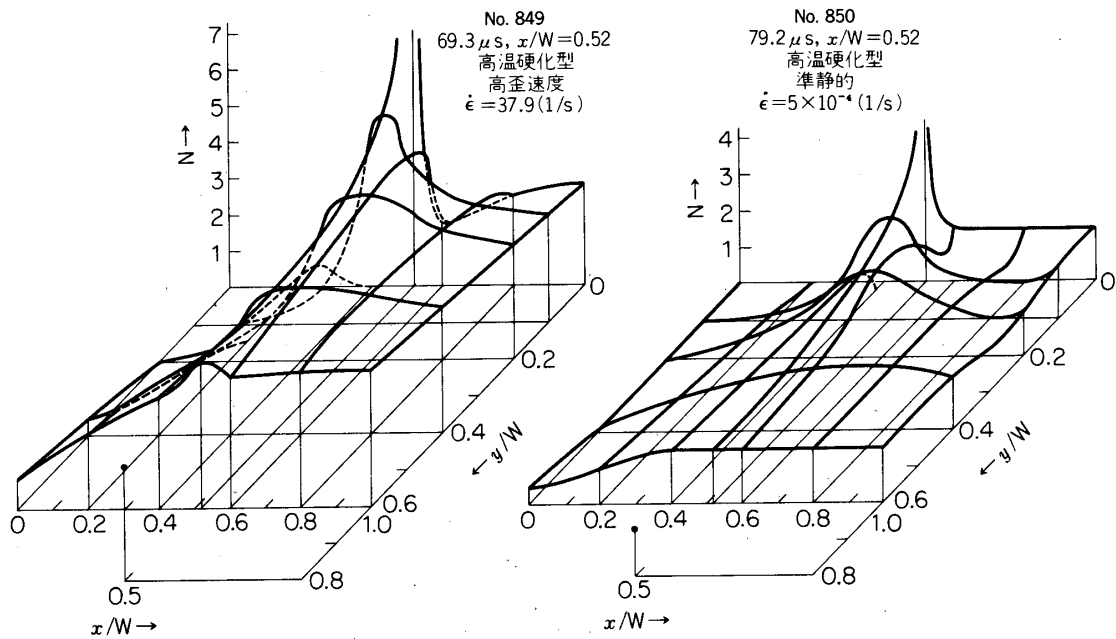
から対比をさせて, $x/W=0.31$, $x/W=0.52$, $x/W=0.82$ までについて両者のN分布を三次元的に比較表示をした。第8図から第11図までがそれで, 第8図は, 進行クラックが将にスタートする瞬間である。引続き第9図は, No. 849(高歪速度場合)では $x/W=0.31$ までクラックが進行するのに $39.6 \mu\text{s}$ かかっているのに対し, No. 850(準静的場合)では同じ $x/W=0.31$ の距離をクラックが進むのに $49.5 \mu\text{s}$ 要している。第10図では, 進行クラックは $x=0.52W$ となってNo. 849(高歪速度場合)は, $69.3 \mu\text{s}$, No. 850(準静的場合)は $79.2 \mu\text{s}$



第8図 三次元繰回数分布(その1)



第9図 三次元繰回数分布 (その2)

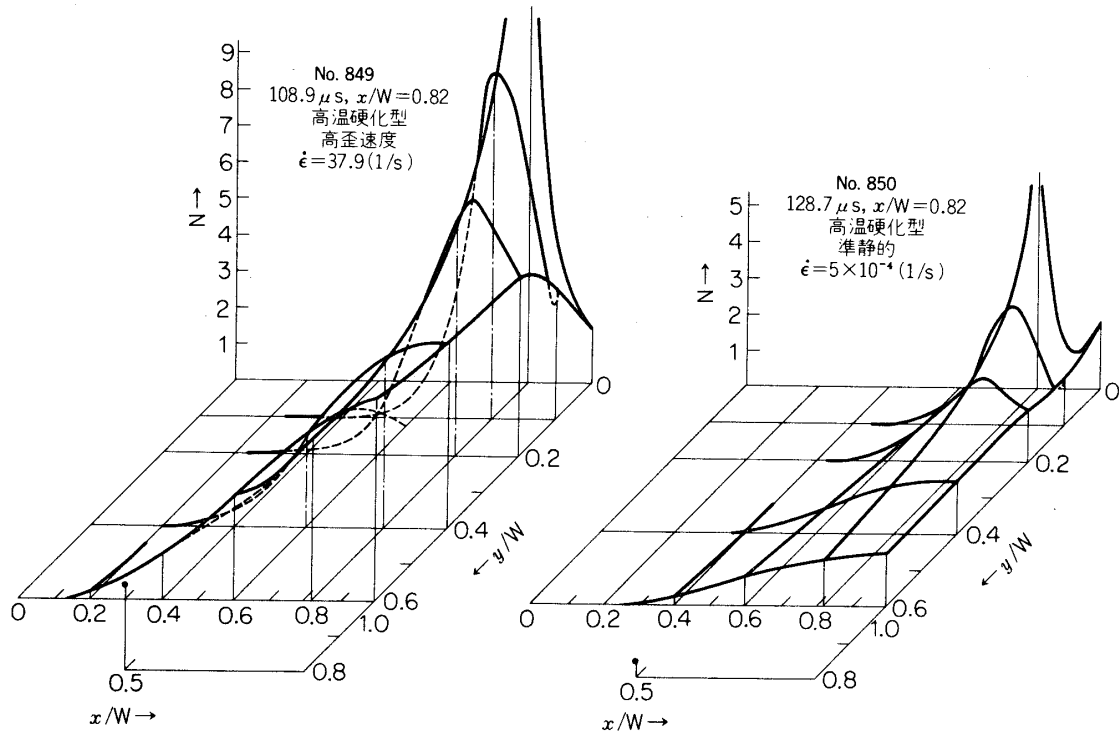


第10図 三次元繰回数分布 (その3)

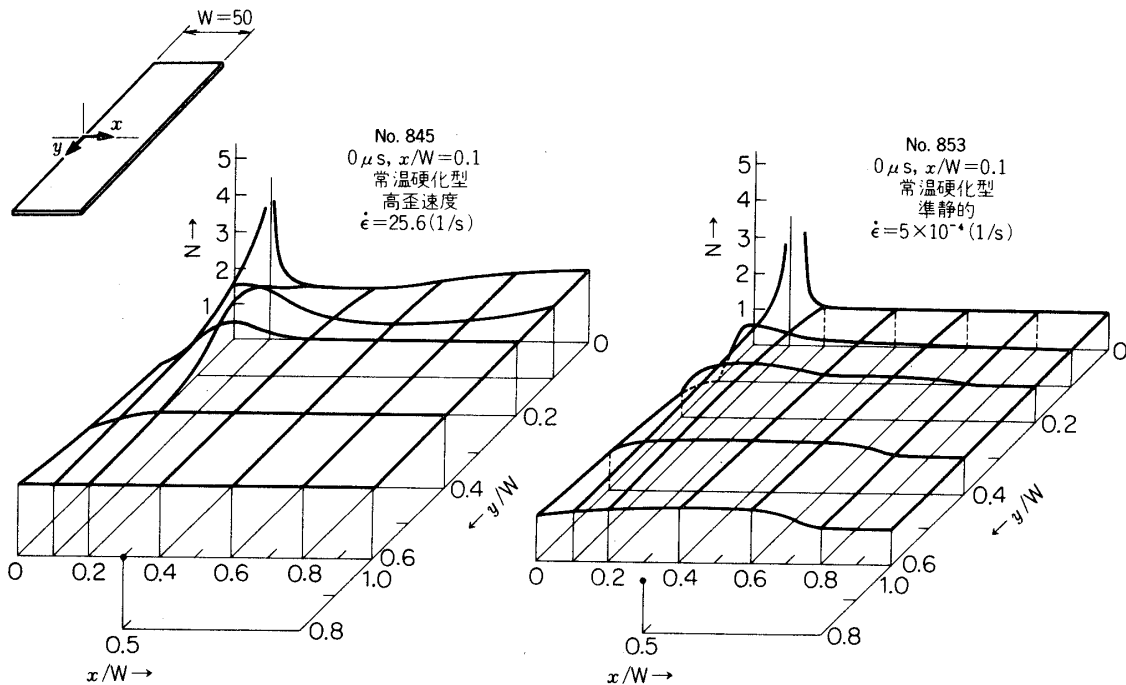
かかっており、第11図では更にクラック先端が $x = 0.82 W$ まで進んだ時の状態で、No. 849 (高歪速度場合) は $108.9 \mu s$ 、No. 850 (準静的場合) は $128.7 \mu s$ を要している。

4.2 常温硬化型試験片

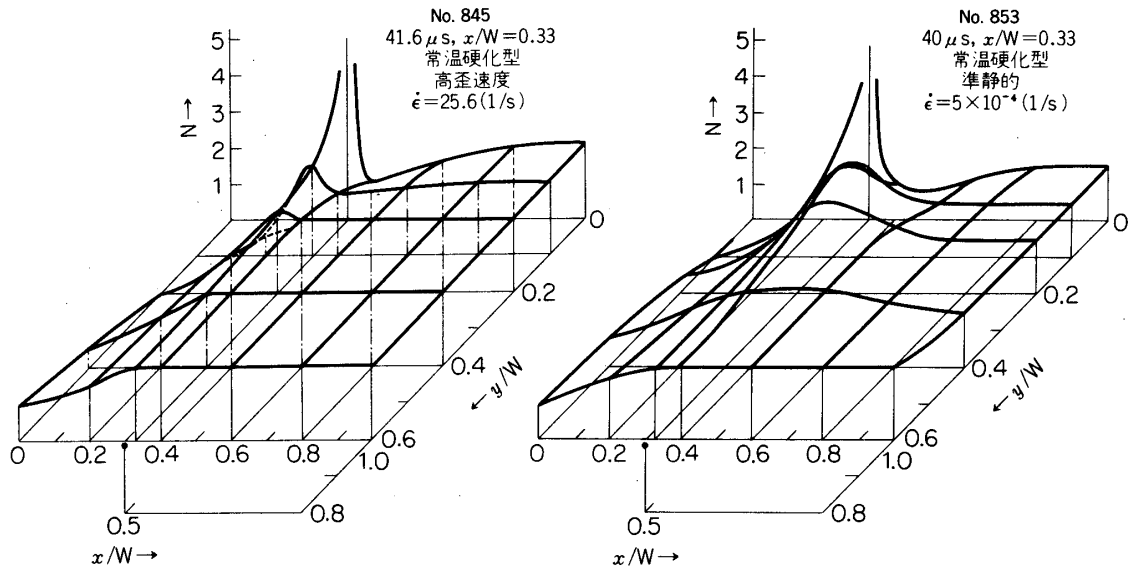
第12図～第15図は、常温硬化型試験片についての三次元N分布を示している。この場合



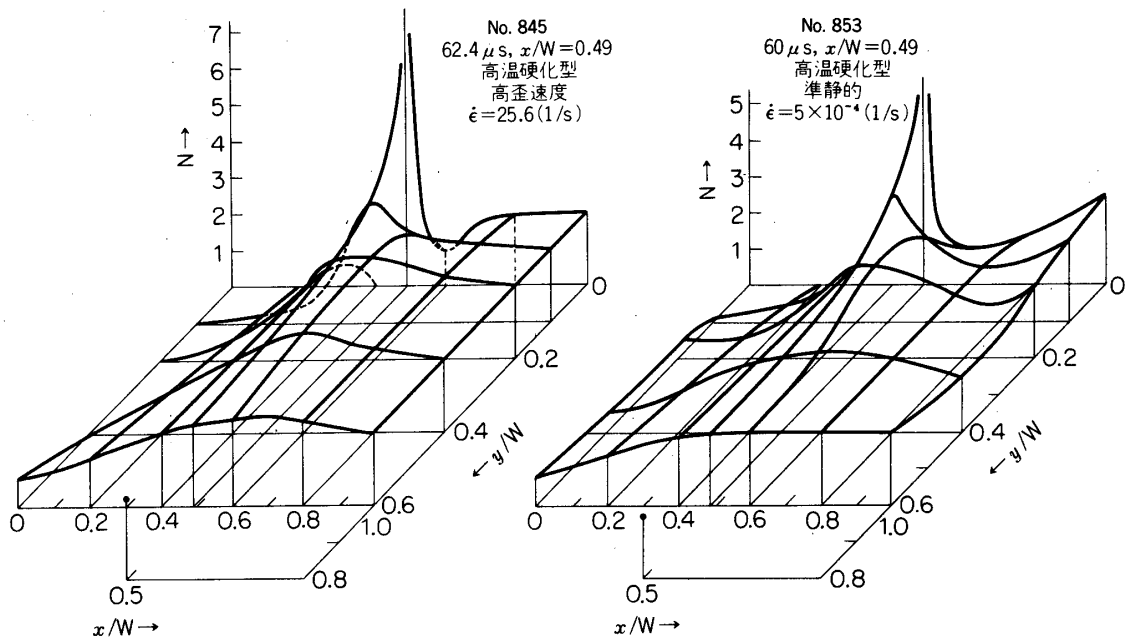
第 11 図 三次元綫次数分布 (その 4)



第 12 図 三次元綫次数分布 (その 5)

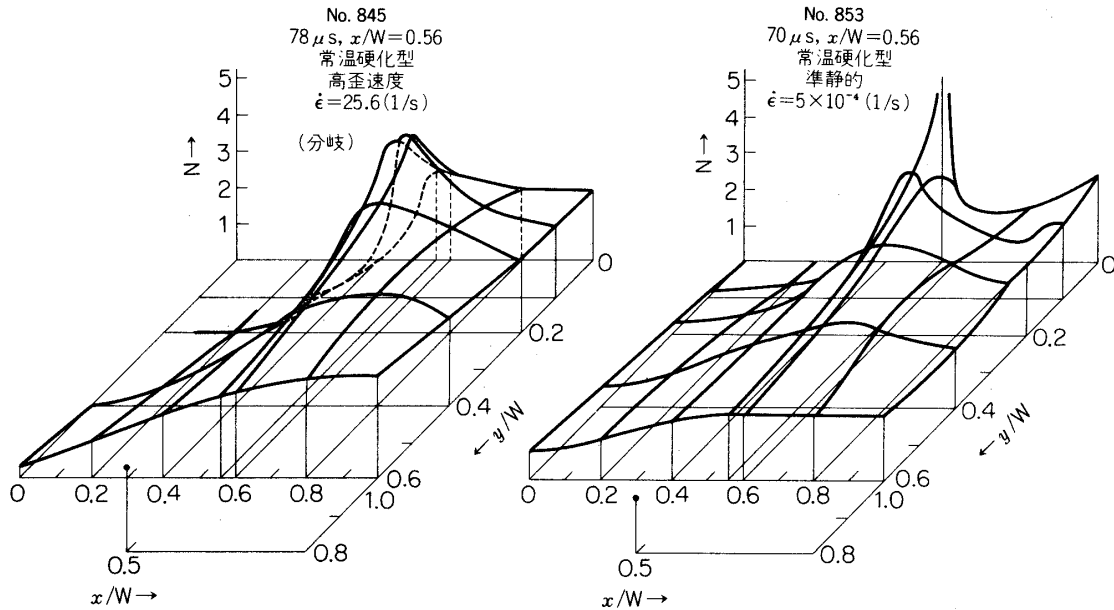


第13図 三次元繰回数分布 (その6)



第14図 三次元繰回数分布 (その7)

は高歪速度 $\dot{\epsilon} = 25.6/\text{sec}$ の試験片No. 845 と、準静的場合 $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-4}/\text{sec}$ の試験片No. 853 との対比である。前掲の高温硬化型試験片と同様に、クラックがスタートする時 ($x = 0.1W$) が第12図に、クラック先端が $x = 0.33W$ が第13図、 $x = 0.49W$ が第14図、 $x = 0.56W$ が第15図に夫々示されている。但し、第15図のNo. 845では既にクラックの分岐 (crack bifurcation) が発生しており、この場合の対比は、必ずしも適当ではないとも考えられ



第15図 三次元繰回数分布(その8)

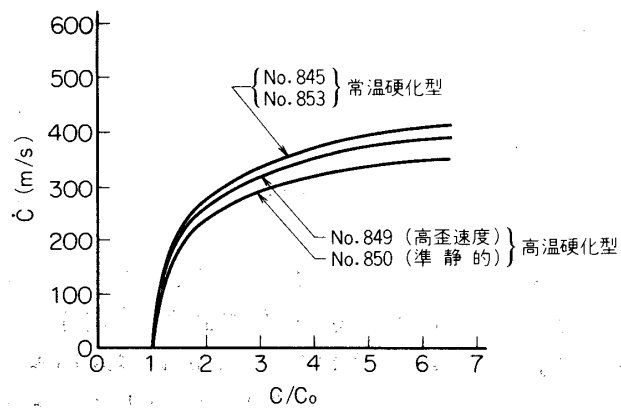
る。これより以後の対比は、従って、行なわなかった。

5. 評 価

歪ゲージにより、歪速度を測定したが、歪ゲージ貼付位置延長線上近傍にまで進行クラック先端が到達するまでは、一定歪速度値を示した。第6図に示すように、歪ゲージが1ヶ所であった為、このような結果になったが、更に歪ゲージ貼付個所が増えれば、同様の結果が得られることは既に確認してあり[4]、従って試験中の進行クラック前方の試験片全域についての歪速度は、所定の値を有するものと考えられる。

高温硬化型については、前掲第8～第11図の対比から、明らかに歪速度に依存したN分布を示している。高歪速度場合には、特に、進行クラック先端近傍に強い集中が見られ、主応力差の差異が示されており、従って、変形集中も大きく、クラック伝播速度も大きくなることが考えられ、事実、今回の一連の実験より得た第16図のクラック伝播速度曲線にもあらわれている。但し、第16図において、 C =クラック長さ、 C_0 =初期クラック長さ=5mmである。

常温硬化型については、N分布に



第16図 動的クラック伝播速度(エポキシ)

ついて高歪速度，準静的両者に殆ど差異がなく，第16図のクラック伝播速度曲線についても，ほぼ一致している。この原因については，常温硬化型が，依然，硬化が進行中で未だ不安定状態にある為，エポキシの本来の粘弾性特性があらわれないものと思われる。

クラック伝播速度については，脆性弾性体の理論終局速度 $\dot{C}_t = 0.38 \sqrt{E/\rho}$ は，高温硬化型について679m/sec，常温硬化型について663m/secで，現実の実験データとは，かなりかけはなれており，この程度の歪速度範囲では，エポキシの粘性項が働き，従って弾性体として取扱かうことが出来ないことを意味するものと思われる。

6. 結 論

動的クラック伝播時の光弾性等色線縞次数分布が高温硬化型エポキシについて，外的歪速度に依存することが明らかにされ，特に，三次元的表示によって，高歪速度場合と準静的場合との差異がはっきりと示された。このことは，主応力差が外的歪速度に依存することを意味し，クラック伝播速度の歪速度依存性をも裏付けるものである。ただし，不安定な常温硬化型エポキシについては，このような明確な差は得られなかったので，上述の粘弾性に特有の歪速度依存性は，試験片の硬化条件の安定したものに，あらわれるものと思われる。

7. 謝 辞

東大宇宙航空研究所 河田幸三教授の貴重なる御討論に謝意を表すものである。河田研究室 橋本彰三助手の実験への御助言を感謝するものである。又，小林研究室 麻生田栄寿君および西倉茂君の実験に対する御協力に御礼を申上げるものである。東大工学部附属総合試験所 高速度カメラ室の諸氏にも御礼を申上げるものである。

1974年7月11日 材料部

尚，本研究は，衝撃工学研究の一環として行なわれたものである。

参 考 文 献

- [1] A.A. Wells & D. Post, Proc. Soc. Experimental Stress Analysis, 16, 69 (1958).
- [2] 小林昭，佐藤正，“クラック伝播の動光弾性解析”東大宇宙航空研究所報告，第9巻，第2号(C)，636(1973年6月)。
- [3] 小林昭，佐藤正，大谷信男，“動的クラック伝播における歪速度効果——粘弾性体における解釈” 日本航空宇宙学会誌，第21巻，第230号，153(1973年3月)。
- [4] 東大宇宙航空研究所 小林研究室 未発表データ(1974年5月)。