

アルミニウム合金の動的クラック伝播

小林 昭・大谷 信男・宗村 昌幸

Dynamic Crack Propagation in Aluminum Alloys

By

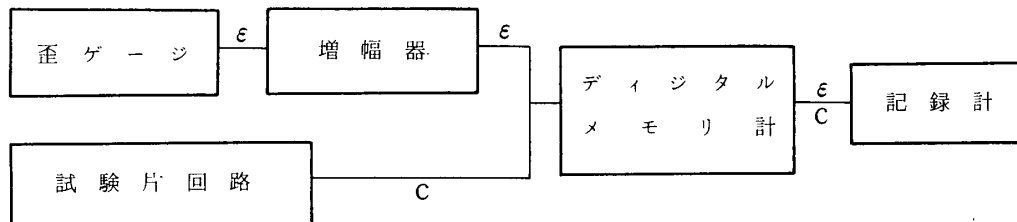
Akira KOBAYASHI, Nobuo OHTANI and
Masayuki MUNEMURA

1. は し が き

アルミニウム合金のような、いわば延性材料とされているものの動的クラック伝播中の挙動を調べたものは殆ど見当たらないが、航空機材料としての主要構造材料であるアルミニウム合金のそれを調べることは意義があると考えられる。ここでは、所謂 opening mode の負荷に於て、負荷速度即ち外的歪速度を変化させた場合に生ずる、動的クラック伝播速度や試験片内の歪変動が極めて短時間内におこる、動的クラック伝播中にどのように変化するかを調べ、考察を行った。

2. 動的クラック伝播時の計測手法

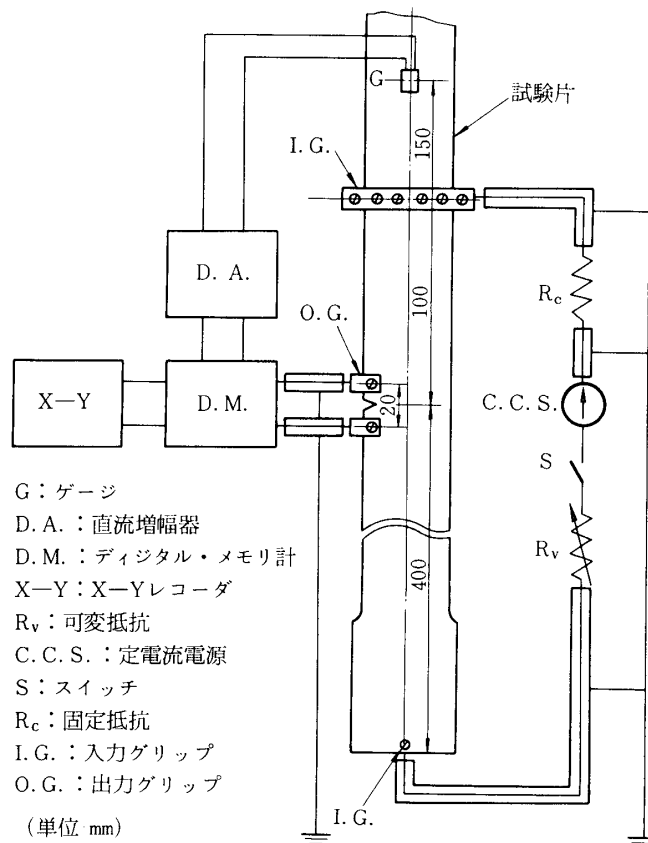
動的クラック伝播現象は、通常の規模の試験では数百 m sec, 乃至数百 μ sec の短時間内



第1図 計測ブロック図

に終るので、その計測は瞬間現象を一旦、記憶しておき、後刻、記録計で再生する方法がとられる。クラック伝播中の歪の変動の計測には、歪ゲージの立上り特性が衝撃に対して充分応答出来ることを利用した。又、クラック伝播速度計測については、従来から速度ゲージ法、電気ポテンシャル法、超音波法、高速度写真法など色々用いられてきている。これらの各手法の詳細についてはここでは触れないが、各々一長一短がある [1]。本研究におけるような金属材料を対象とする時には、速度ゲージ法は絶縁のための coating が必要となり、むしろ電気ポテンシャル法がよい。又、金属に必然的に伴う塑性変形により、速度ゲージのクラック伝播による切断のタイミングが狂うこともあり、且、計測値は継続的に得られるなど、都合の悪い点がある。電気ポテンシャル法にも不具合な点があるが、金属材料に用いた時のメリットが上まわるので、ここでは電気ポテンシャル法によった。

まず第1図に計測ブロックを示す。第1図に於て試験片回路とあるのが後述する電気ポテンシャル法による動的クラック伝播速度計測回路であり、データの記憶に用いた デイジタ



第2図 試験片回路詳細など

ル・メモリ計は理研電子製トランジェント・コンバータTCED-1000, 記憶データの再生に使用した記録計は理研電子製X-YレコーダF-43P, 増幅器は自家製である。尚, Cはクラック長さ, ϵ は歪を夫々意味する。この計測方法により, 以下に述べる動的クラック伝播速度およびクラック伝播中の歪変動の計測を行った。

(1) 動的クラック伝播速度の計測

第2図に電気ポテンシャル法による場合の試験片回路の詳細と関連計測装置との接続などを示す。動的クラック伝播速度の測定は, 先づ試験片上に入力グリップ(I.G.)より18Aの一定電流を流し, 変動がある場合は可変抵抗 R_v により一定になるようにする。クラックが進行すれば, 当然抵抗が変化するため, 出力グリップ(O.G.)より電圧変化 ΔE の形でとり出す。この時, time scaleを入れておけば, 予め得られた $\Delta E \sim C/C_0$ (C =クラック長さ, C_0 =初期クラック長さ)の校正曲線を利用して, 動的クラック伝播速度 $\dot{C} = dc/dt$ が求められる[2, 3]。

(2) 歪変動の計測

前述したように歪ゲージによった。即ち, 共和電業製箔フェステルゲージKFC-2-500-C1-23を高歪速度場合に用いた。このゲージは, ゲージ長さ2mm, 抵抗500オーム, 単軸測定用, アルミニウム合金用のもので, 1.5%までの歪変動には完全に追従出来るものであり, 歪ゲージ位置は第4図に示してある。尚, 準静的場合の歪計測には引張試験装置付属のロードセル(歪ゲージ利用)による値をとった。

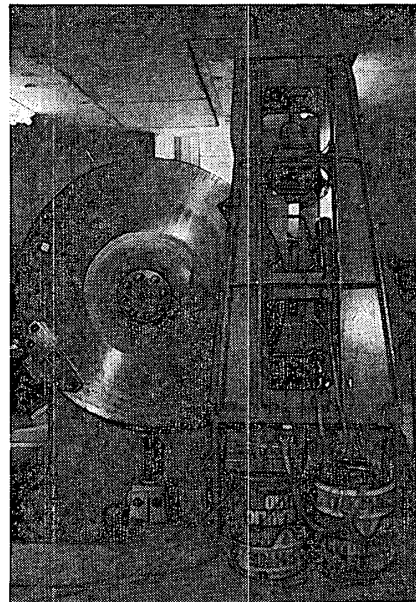
3. 負荷装置

(1) 高歪速度時の負荷装置

第3図に示す直径1.4mの回転円板式垂直負荷型の高速固体衝撃装置(三菱重工製)を用いて, 試験片に第1表のような高歪速度負荷を与えた。第1表に於て, 動的クラック伝播発生時の引張円周速度 V は円板の回転数より求め, 換算歪速度 $\dot{\epsilon}$ は後述の高歪速度時の試験片(第4図)平行部長さ550mmに対するものである。試験片はmode I (opening mode: 開口形)で負荷される。

第1表 高歪速度負荷条件

引張円周速度 V m/s	1.83	5.9	18.3	38.1
換算歪速度 $\dot{\epsilon}$ 1/s	3.33	10.7	33.3	69.3



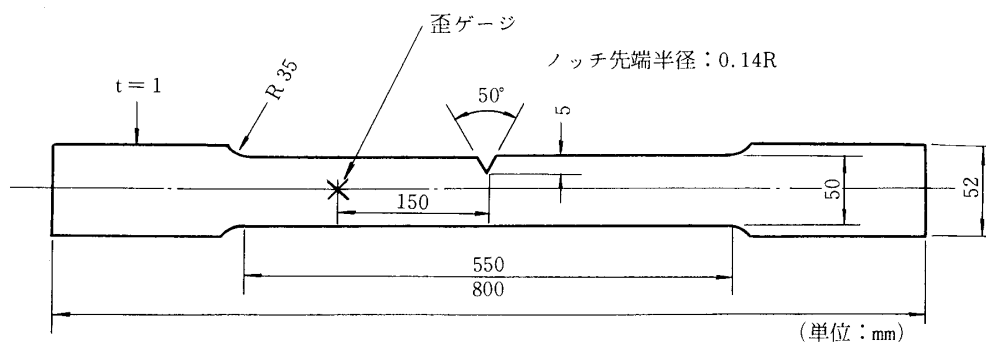
第3図 高速固体衝撃装置

(2) 準静的負荷装置

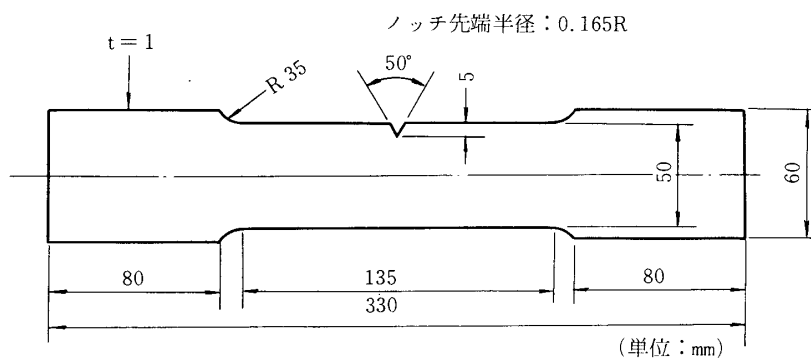
インストロン型定速引張試験機（東洋ボールドウィン製 UTM-1）を用い、引張速度 1.66 mm/s を後述第5図の準静的試験片に与えた。この場合の平行部長さ 135 mm に対し、換算歪速度は $1.23 \times 10^{-2} / \text{s}$ になる。やはり mode I の負荷になる。

4. 試験片

準静的時と高歪速度時とは負荷装置が異なる為、同一寸法の試験片を用いることが出来ず、



第4図 高歪速度時の試験片

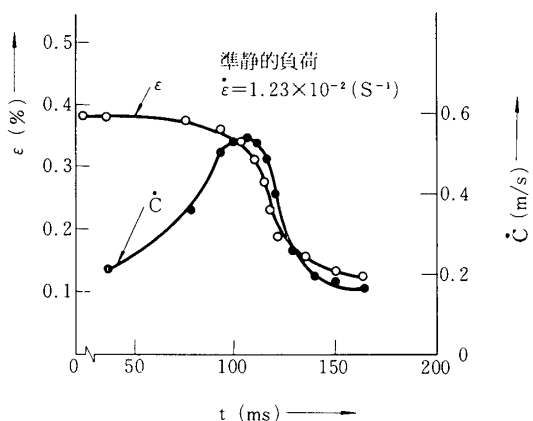


第5図 準静的試験片

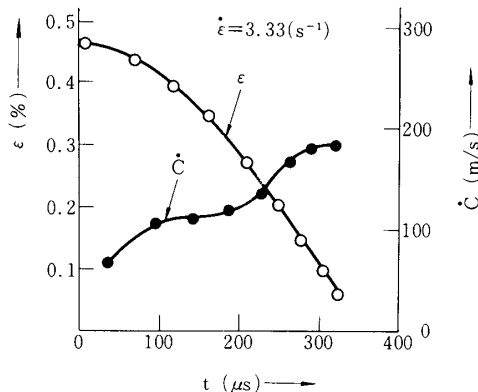
第4図および第5図に示すように夫々に異なった寸法のものを用いた。いずれもアルミニウム合金2024-T3で、圧延方向に試験片長さを取り製作した。尚、初期クラックのない場合は、準静的破断応力 $\sigma_B = 48 \text{ kg/mm}^2$ 、その時の破断歪 $\epsilon_B = 13\%$ 、準静的ヤング率 $E = 7,750 \text{ kg/mm}^2$ であり、歪は $0.45 \sim 0.47\%$ までは完全にフックの法則にあっていた。

5. 実験結果

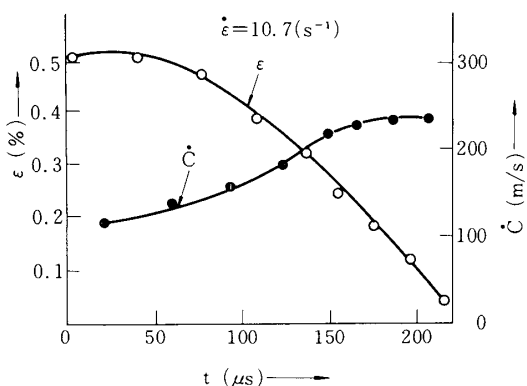
動的クラック伝播中の試験片における、歪変動 ϵ および動的クラック伝播速度 \dot{C} を計測した結果を、第6～10図に示す。但し、第6図の ϵ の値は前述したように、引張試験装置附属のロードセルによる荷重値を、試験片の初期クラックのない場所での断面積 (50 mm^2) で割り、更にヤング率 $E = 7,750 \text{ kg/mm}^2$ で割ったもので、クラック伝播径路より充分遠ざかった試験片内の歪を示すものと考えてよい。クラック伝播に先立つ負荷開始時から歪ゲージによる計測を行ったが、その一例を第9図に併記してある。このように、負荷開始からクラック伝播開始までは、他の歪速度場合についても皆一様により直線性を示している。第2表にこれらの



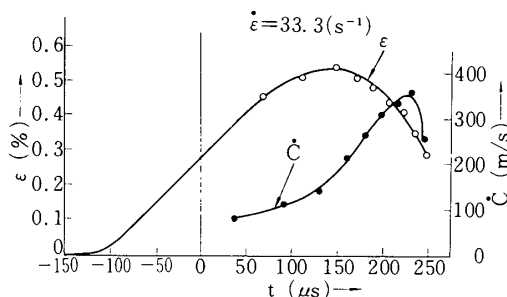
第6図 $\epsilon \sim \dot{C} \sim t$ ($\dot{\epsilon} = 1.23 \times 10^{-2} / \text{s}$)



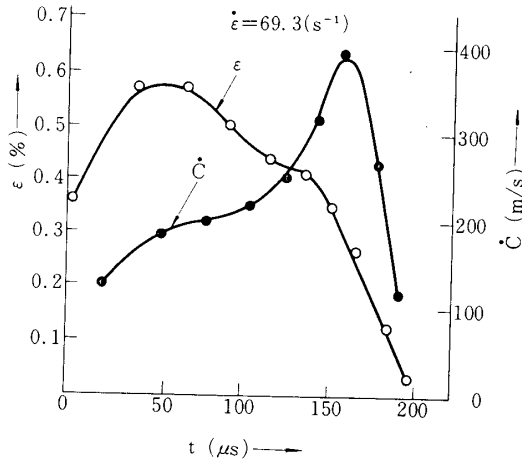
第7図 $\epsilon \sim \dot{C} \sim t$ ($\dot{\epsilon} = 3.33 / \text{s}$)



第8図 $\epsilon \sim \dot{C} \sim t$ ($\dot{\epsilon} = 10.7 / \text{s}$)



第9図 $\epsilon \sim \dot{C} \sim t$ ($\dot{\epsilon} = 33.3 / \text{s}$)



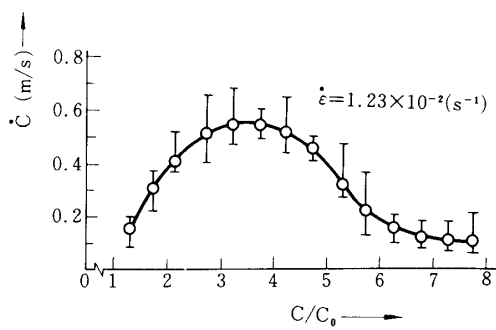
第10図 $\epsilon \sim \dot{C} \sim t$ ($\dot{\epsilon} = 69.3/s$)

第2表 歪ゲージによる実測歪速度の値

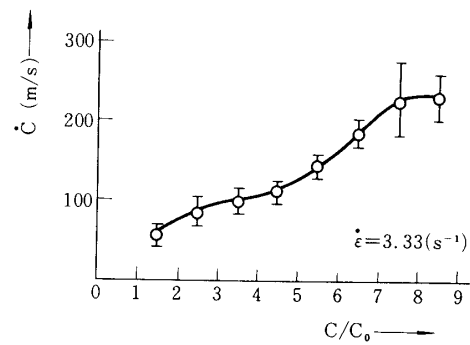
円周速度からの 換算歪速度 $\dot{\epsilon}$ 1/s	3.33	10.7	33.3	69.3
歪ゲージによる 実測歪速度 1/s	2.39	6.39	28.4	64.4

歪ゲージによる実測値をかかげる。尚、試験片本数は、準静的場合 ($\dot{\epsilon} = 1.23 \times 10^{-2} / s$) が6本、高歪速度場合では $\dot{\epsilon} = 69.3 / s$ が1本、他はすべて3本であった。

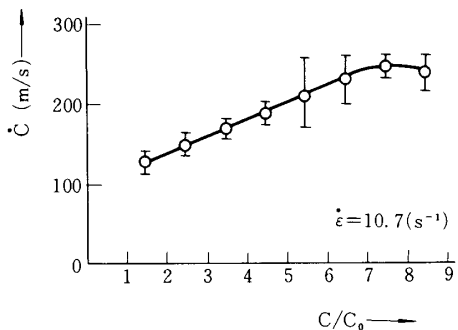
これらの \dot{C} および ϵ を、進行クラック先端位置 C について初期クラック長さ C_0 で割って無次元化表示したのについて図示したものを、夫々、第11～16図および第17～21図に示す。尚、第16図は、第11～15図を総括したもので、縦軸の \dot{C} を対数表示してある。



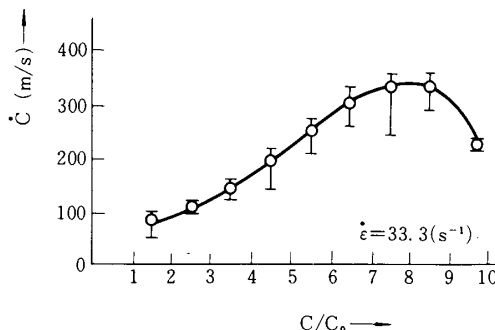
第11図 $\dot{C} \sim C/C_0$ ($\dot{\epsilon} = 1.23 \times 10^{-2} / s$)



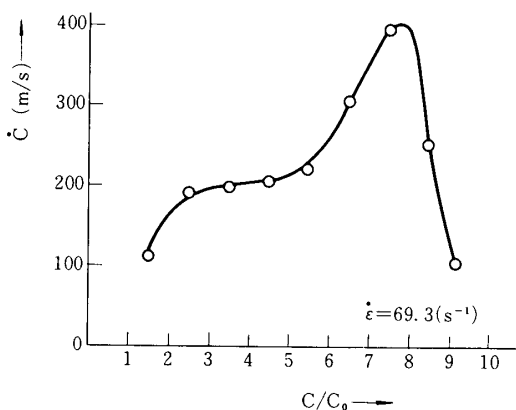
第12図 $\dot{C} \sim C/C_0$ ($\dot{\epsilon} = 3.33 / s$)



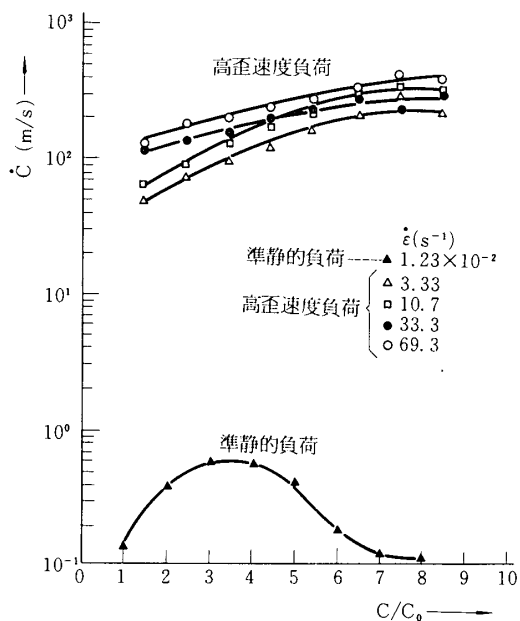
第13図 $\dot{C} \sim C/C_0$ ($\dot{\epsilon} = 10.7/s$)



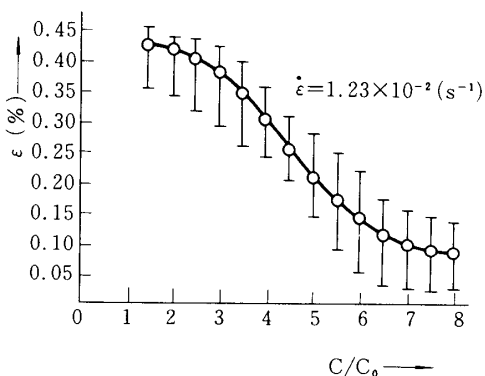
第14図 $\dot{C} \sim C/C_0$ ($\dot{\epsilon} = 33.3/s$)



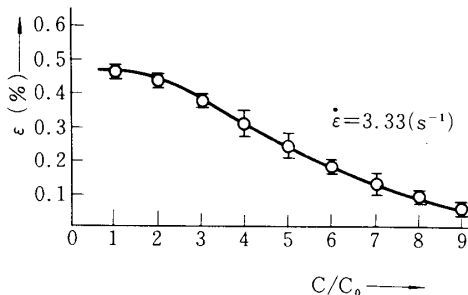
第15図 $\dot{C} \sim C/C_0$ ($\dot{\epsilon} = 69.3/s$)



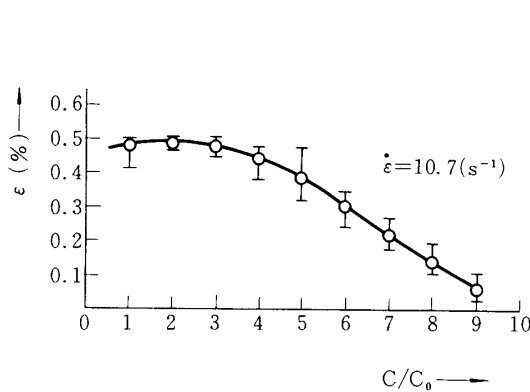
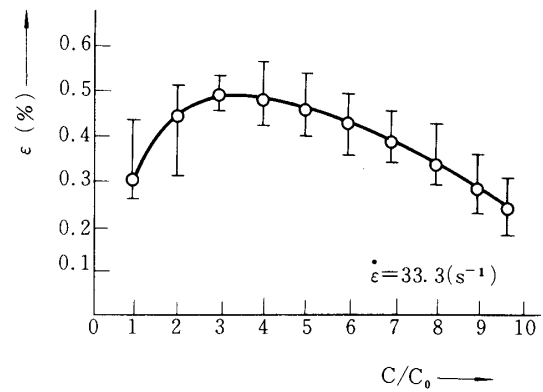
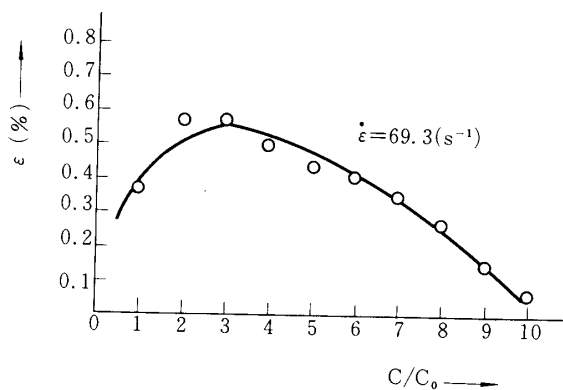
第16図 動的クラック伝播速度の外的歪速度への依存性



第17図 $\epsilon \sim C/C_0$ ($\dot{\epsilon} = 1.23 \times 10^{-2}/s$)



第18図 $\epsilon \sim C/C_0$ ($\dot{\epsilon} = 3.33/s$)

第19図 $\epsilon \sim C/C_0$ ($\dot{\epsilon} = 10.7/s$)第20図 $\epsilon \sim C/C_0$ ($\dot{\epsilon} = 33.3/s$)第21図 $\epsilon \sim C/C_0$ ($\dot{\epsilon} = 69.3/s$)

6. 検 討

(1) 動的クラック伝播速度

第6～10図, 第11～15図および第16図を見れば, 準静的場合と高歪速度場合とでは明らかに速度のオーダーが3桁ちがって居り, 又, 高歪速度場合の各歪速度についても, 大きい歪速度の方が速度も大きくなる傾向にあることが認められる. この意味で, 動的クラック伝播速度の歪速度依存性があると云える. 準静的場合には, $C/C_0 = 3 \sim 4$ 附近で最大値を示しているが, この原因については今後究明する予定である.

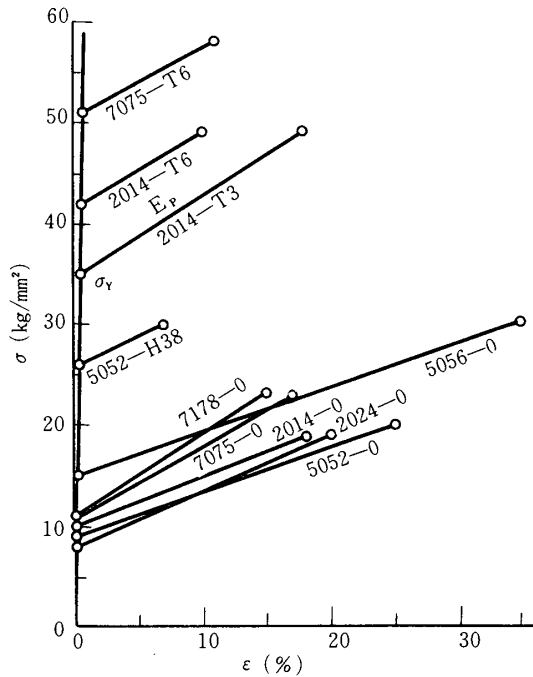
高歪速度場合でも, 伝播速度の挙動は必ずしも一様の傾向ではなく, 本実験の範囲では, $C/C_0 = 8$ あたりまでは $\dot{\epsilon} = 33.3/s$ まで動的クラック伝播速度は増加してくるが, $C/C_0 = 9$ になると $\dot{\epsilon} = 33.3/s$ からは確実に減少を示し, データが得られてはいないがおそらく $\dot{\epsilon} = 10.7/s$ でも減少するものと推察される. 前述したように, $\dot{\epsilon} = 69.3/s$ の場合は試験片本数が1本の為, 常に第10図および第15図にかかげるようになるかどうかは多少疑問であり, 今後のデータ蓄積にまつものである.

中川・岸田等 [2] の 7075-T6材へのホプキンソン棒利用の衝撃実験結果でも, 動的クラック伝播速度は, クラック進行の初期段階では外的応力速度 ($\sigma \sim 10^5 \text{kg/mm}^2 \cdot \text{s}$) が増すにつれて増加している. 本結果でも応力速度に換算すると, 大体 $10^5 \text{kg/mm}^2 \cdot \text{s}$ 程度になる.

(2) 歪変動

第 6～10図の歪の時間に対する変動および第17～21図の $\epsilon \sim C/C_0$ の結果を見ると、クラック伝播がはじまると、 $\epsilon \sim t$ の前述した、負荷開始からの直線関係は、 $\dot{\epsilon} = 33.3/s$ および $\dot{\epsilon} = 69.3/s$ を除く場合では保たれず減少の一途をたどる。 $\dot{\epsilon} = 33.3/s$ と $\dot{\epsilon} = 69.3/s$ では、おおむね $50 \mu S$ までは $\epsilon \sim t$ の直線性を保ち、 $C/C_0 = 3$ あたりで ϵ の最大値を夫々示す。第2表より、 $\dot{\epsilon} = 33.3/s$ と $\dot{\epsilon} = 69.3/s$ とは、歪ゲージによる実測歪速度が円周速度からの換算歪速度に近い値を示しているが、このことは高歪速度側になってくると、試験片が一樣に引張られるようになってくることを意味して居り、クラック伝播開始後もしばらくはこの影響があることを示すものと思われる。

中川・岸田等 [2] の結果では、応力速度 $\dot{\sigma} = 10^5 \text{ kg/mm}^2 \cdot \text{s}$ のオーダーで応力はクラックが進行しはじめると、一旦、増加した後に減少している。この結果と比較する為に、歪を応力に換算する必要があるが、前述したように、歪が 0.47% あたりまではフックの法則に適合するから、第21図の $\dot{\epsilon} = 69.3/s$ の $C/C_0 = 2 \sim 4$ の部分以外は $\sigma = E \epsilon$ の換算が出来る。但し、この時、ヤング率 E には先に求めた準静的値 $E = 7,750 \text{ kg/mm}^2$ を用いたが、このことはアルミニウム合金 2024 などの実用 FCC 材料の $\sigma \sim \epsilon$ の概略線図が、第22図のように弾性一直線硬

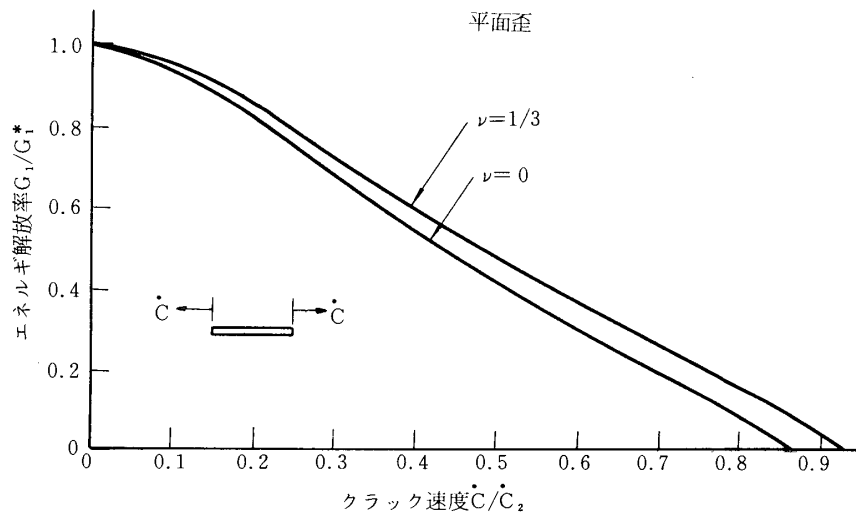


第22図 構造用アルミニウム合金の特征的応力～歪曲線 [4]

化型として略々近似出来、歪速度が増加しても初期のヤング率（即ち、準静的ヤング率）は変化せずに降伏応力 σ_y のみ上昇するとしたからである [4]。この考えによれば、先に除外した $\dot{\epsilon} = 69.3/s$ の $C/C_0 = 2 \sim 4$ の部分についても、歪速度が増加すれば σ_y が上昇して準静的ヤング率 E を示す歪の上限が上昇するので、結局、近似的にはこれらの除外したものについてもフックの法則を適用して大過ないと云えよう。従ってここでは、すべての $\dot{\epsilon}$ の場合について $\sigma = E \epsilon$ 、 ($E = 7750 \text{ kg/mm}^2$) を用いて歪 ϵ を応力 σ に換算することになるが、ヤング率 E が一定ならば、第17~21図の $\epsilon \sim C/C_0$ 関係の傾向は、そのまま応力 $\sim C/C_0$ 関係になるから、 $\dot{\epsilon} = 33.3/s$ と $\dot{\epsilon} = 69.3/s$ は前述の中川・岸田等の結果とよくあっていることになる。 $\dot{\epsilon} < 10.7/s$ 以下の歪速度領域では、応力は終始減少函数になって居り、この点から云えば脆性破壊現象になる。

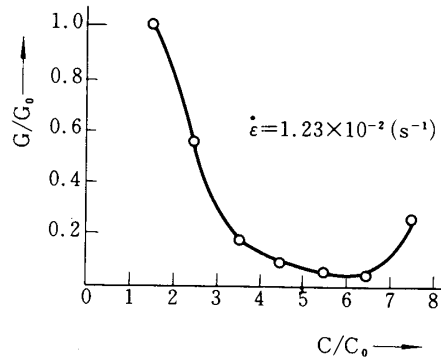
(3) エネルギー解放率の推測

Sih [5] は、Broberg のクラック即ち、無限弾性体内に一定速度 \dot{C} で進行するクラックについて、動的時のエネルギー解放率 (energy release rate) G_1 を、平面歪状態の場合に、クラック伝播速度の函数として理論的に求めているが、第23図にそれをかかげる。第23図に於て、 G_1^* は静止クラックについての値であり、 \dot{C}_2 は剪断弾性波速度を意味する。これによれば、ポアソン比 $\nu = 1/3$ の場合、 G_1 はクラック伝播速度の増加と共に減少し、 \dot{C} が $0.92 \dot{C}_2$ (= Rayleigh 波速度 C_R) に近づくと共に零になっていくことになる。つまり、Rayleigh 波速度 C_R がクラック伝播速度の理論的上限になる。実際にはクラック伝播速度が大きくなると分岐 (bifurcation) がおこるが、分岐発生以前にこの上限に到達することは無く、たかだか $0.7 C_R$ ばかりである。この第23図より、 G_1 は \dot{C} が小さい時には、動的効果を含まない準静的場合の G の値 G_1^* と大きい違いを示さないとされる。本研究の範囲では、クラック速度も一定ではなく、最初、静止の状態からスタートして、幅をもって変動

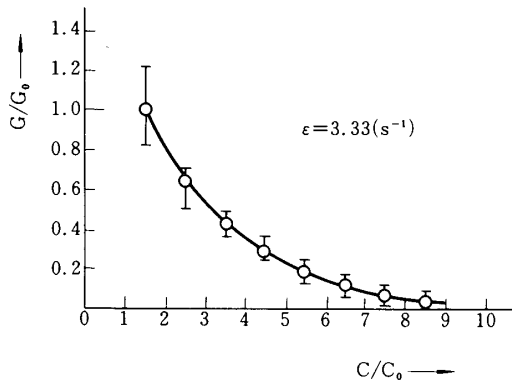


第23図 エネルギー解放率とクラック伝播速度との関係
(弾性体内、平面歪状態) [5]

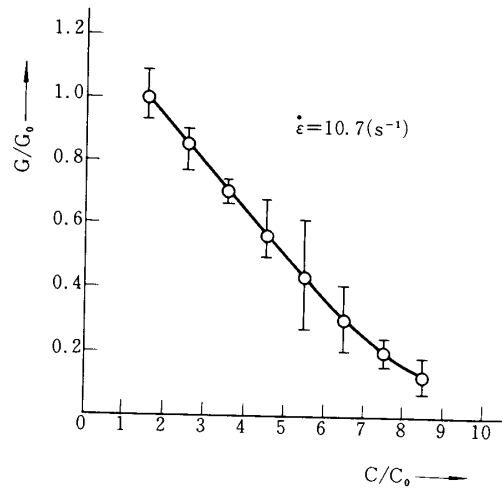
しているが、今かりに最初から最大速度でクラックが走ったとしても、動的クラック伝播速度は大きくてもたかだか 400 m/s 程度で、一方、 \dot{C}_2 は大凡 3,000m/s であり、第23図よりその誤差は最大でも 5%程度と見積られるので、平面歪状態と平面応力状態との差はあるが、動的クラック伝播に於て得られたデータを、準静的なコンプライアンス手法 [6] で整理を行っても、大筋に於て誤りが無いものと考えられる。この結果は、第24~28図に示される。但し、



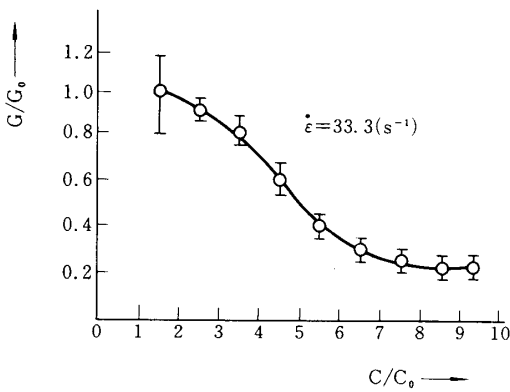
第24図 エネルギー解放率の変化
($\dot{\epsilon} = 1.23 \times 10^{-2} / \text{s}$)



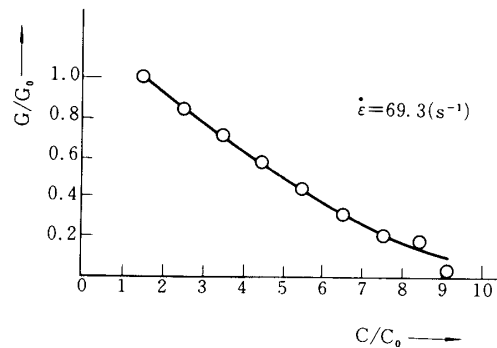
第25図 エネルギー解放率の変化
($\dot{\epsilon} = 3.33 / \text{s}$)



第26図 エネルギー解放率の変化
($\dot{\epsilon} = 10.7 / \text{s}$)



第27図 エネルギー解放率の変化
($\dot{\epsilon} = 33.3 / \text{s}$)



第28図 エネルギー解放率の変化
($\dot{\epsilon} = 69.3 / \text{s}$)

$G = \frac{P^2 d \lambda}{2 d A} = \frac{P d \delta}{2 d A}$ であり、 P = 荷重、 δ = 荷重点の変位、 $\lambda = \delta / P$ 、 A = クラック進行面の面積、又、 G_0 は、各歪速度における最初の G の値である。

尚、高歪速度場合（第25～28図）は、歪ゲージ値よりフックの法則により荷重を算出してある。第24図の G/G_0 の挙動と、第25～28図の G/G_0 の挙動とは、異なった様相を呈して居り、第24図では C/C_0 が4～7に至ると G/G_0 の減少を示しているが、クラック伝播速度 \dot{C} の第11図にあらわれている \dot{C} の最大速度領域 $C/C_0 = 2 \sim 5$ とは対応していない。一方、第25～28図のいずれに於ても、 G/G_0 は、クラックが進むにつれて低下して居り、第14～15図の $C/C_0 = 9$ 近傍を除いて \dot{C} の漸増傾向と対応していて、Sih による第23図の傾向とあっている。 G はクラックに対する抵抗を示すので、 G の低下と \dot{C} の増加とはこの意味で相関々係が理解出来る。

7. 結 論

アルミニウム合金の opening mode 下での動的クラック伝播について調べ、動的クラック伝播速度については、高歪速度場合 ($\dot{\epsilon} = 3.33/s \sim 69.3/s$) と準静的場合 ($\dot{\epsilon} = 1.23 \times 10^{-2}/s$) とでは3桁もの差異があり、その様相も異なっていることが分った。歪の変動については、歪速度が増加するにつれて、単調減少から、中途に peak を示す増加-減少型に移ることが認められた。線形破壊力学によるコンプライアンス法を、適当な仮定の下に用いて、本実験のデータよりエネルギー解放率 G を推定した結果、高歪速度場合では、殆どの場合、動的クラック伝播速度との相関性が得られ、線形破壊力学で理論的に予測されている傾向にあうことが認められた。尚、今後の究明に待つものが多い。

謝 辞

東大宇宙航空研究所 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、小松茂君、丸山秀尚君の研究への協力に謝意を表すものである。

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金によって行われたことを附記する。

1976年12月4日 材料部

参 考 文 献

- [1] H. Liebowitz (ed.), "Fracture," Vol. II, Academic Press., p. 545 (1968)
- [2] 中川憲治, 岸田敬三他, 日本航空宇宙学会誌, p. 133 (1975年2月)
- [3] 小林昭, 大谷信男他, 第2回衝撃工学シンポジウム講演集, p. 96 (1975年11月)
- [4] 河田幸三, 橋本彰三他, 第3回衝撃工学シンポジウム講演集, p. 197 (1976年9月)
- [5] G. C. Sih, "Inelastic Behavior of Solids," edited by Kanninen et al., McGraw-Hill, p. 607 (1970)
- [6] 例えば, 岡村弘之, 日本機械学会誌, p. 1052 (1972年7月)