

動的クラック伝播に伴う熱境界前線について

小林 昭・宗村 昌幸・大谷 信男・末益 博志

On Thermal Boundary Front observed during Dynamic Crack Propagation
By

Akira KOBAYASHI, Masayuki MUNEMURA, Nobuo OHTANI
and Hiroshi SUEMASU

Abstract: Thermal boundary front observed during dynamic fracture in solids was analysed through experimental techniques, and further, correlations between heat and fracture propagation were studied from theoretical heat conduction standpoint.

概 要

粘弾性体内に、高速クラックが伝播する時に生じる熱発生現象を調べ、液晶フィルム利用により熱境界前線を、又、速度ゲージ手法によりクラック伝播速度を、夫々求め、発生熱量とクラック伝播速度との相関性を解析した。

1. ま え が き

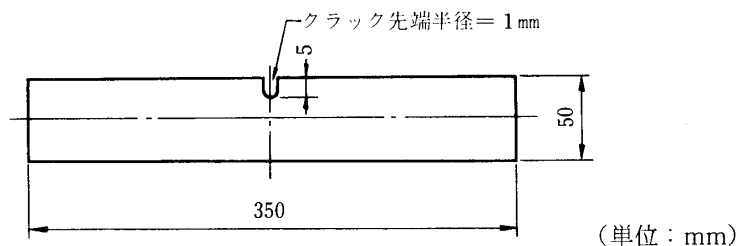
粘弾性体に高速クラック伝播が生じる時、進行クラック先端には、エネルギーの強い集中が見られるので [1]、当然クラック伝播に起因する熱量の発生や温度上昇およびこれから熱境界前線 (thermal boundary front) が伝導することが考えられる。理論的研究には、Kambour & Barker [2]、Rice & Levy [3]、Parvin [4] などがあるが、いずれも主として温度上昇についてであり、しかも、夫々、その結果に著しい差異があり、実験面での確証が必要とされ、わずかに、英国 Cavendish Laboratory の Fuller, Fox & Field [5] が、液晶フィルム (liquid crystal film) および熱電対によって行っているが、尚、究明すべきものが多く残されている。

ここでは、液晶フィルムにより、進行クラックから伝導する熱境界前線を観測・計測し、発生熱量を計算し、クラック伝播速度との関連を調べる。

2. 試験片および実験装置

(1) 試験片および実験手法

住友化学製の PMMA (Polymethyl methacrylate) (商品名 Sumipex) を第 1 図の形状に製作し、常温下でインストロン型引張試験装置により、mode I のクラック伝播を生じさせ、速度ゲージ (後述) によりクラック伝播速度を測定し、又、試験片裏面に塗布した液晶フィルム (後述) により、熱境界前線を求め、計算式によりクラック面からの発生熱量を計算した。荷重は、ロードセルによった。



第 1 図 試験片形状

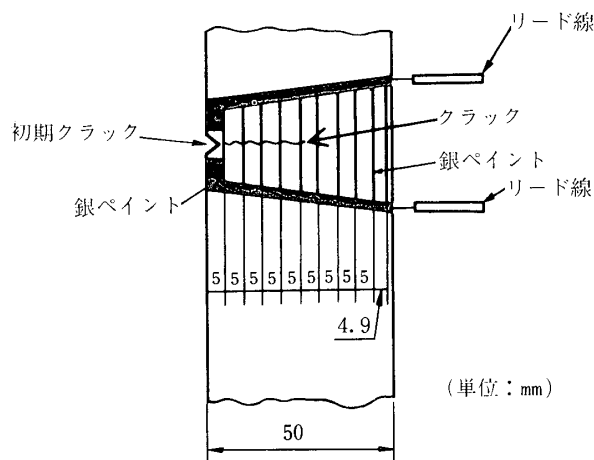
(2) 速度ゲージ法

米国 du Pont 社製の conductive coating material (通称 銀ペイント) No. 4817 を, 第 2 図に示す様に試験片の一面に塗り, 第 3 図の計測系を構成した. 速度ゲージ法の詳細については, 文献 [6] に記述してある.

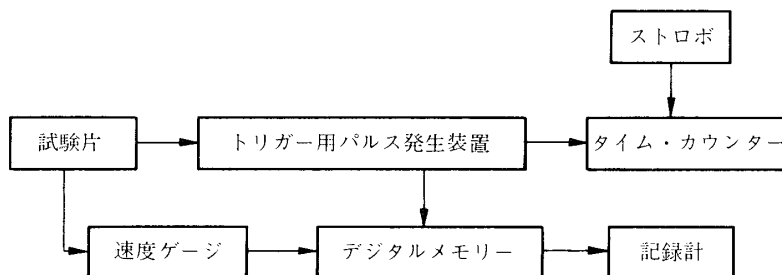
(3) 液晶フィルムによる測定

液晶 (Liquid crystal) は, 1888 年にオーストリアの Friedrich Reinitzer が発見したもので, 複屈折を生じる光学的異方性液体で, 液体と結晶との中間の性質を有する. (cf. ふつうの液体は, 光学的等方性である.)

1963 年にアメリカの Ferguson が液晶による thermography を考案して以来, 実験時の



第 2 図 速度ゲージ配置図



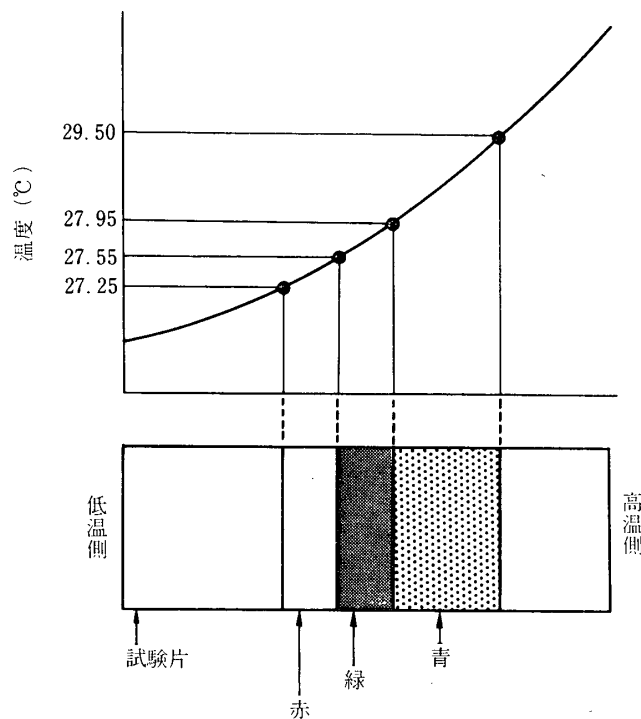
第 3 図 計測ブロック図

toolとして利用されるようになった。現在では、3000種以上の存在が確認されている。

この液晶フィルムは、温度変化に応じて色調が変化するが、原理的には熱電対に比べて response が早く、且つ、全体の状況が観測出来る為、動的クラック伝播に伴う熱境界前線を把握するのに適している。

ここで用いた液晶は、cholesteryl oleyl carbonate 60 wt. %と、cholesteryl nonanoate 40 wt. %の混合物で、予め、黒く塗った (matt black) 上、厚さ約 100 ミクロンに試験片表面 (速度ゲージと反対面) に均一に塗った。実験に先立ち、第 4 図に示すように、液晶フィルムを塗った試験片に温度差を与えて、接触型温度計 (英国 Kane - May Ltd. 製) で温度 ~ 色調変化の較正を行った。温度上昇に伴ない、赤 (27.25°C より) → 緑 (27.55°C より) → 青 (27.95°C より) の変化を示すが、赤 / 緑 境界と 緑 / 青 境界との幅は、0.4°C であった。

実験に際しては、この 0.4°C 幅の熱境界前線をカメラ・シャッターを開放にして、エクタクローム・フィルムにより、クラック伝播が終了した直後に撮影した。この time delay は、クラック伝播終了直後に切断される銀ペイント線により、electronic flash を発光させて撮影する時に、time counter を作動させて正確に計測したが、実験を行って、データがとれた 7 本の試験片についての平均は、1 秒程度であった。



第 4 図 温度～色調変化の較正

3. 実験結果

(1) クラック伝播速度曲線 \dot{C}

PMMA試験片について、前述の速度ゲージ利用により得たクラック伝播速度曲線を第5図にかかげる。ここに W は、試験片幅=50mmである。勿論ばらつきは有るが、これまでに得られたものと同傾向であるが、この場合は、試験片幅がやや不足気味の為、漸近値を得るには至っていない。

(2) 熱境界前線の撮影

第6図は、その一例で液晶フィルムにより得られた破断1.44秒後の熱境界前線である。他の例も含めて、熱境界前線は、巨視的には、略々、直線をなしていることが認められる。

4. クラック伝播に伴う発生熱量の算出

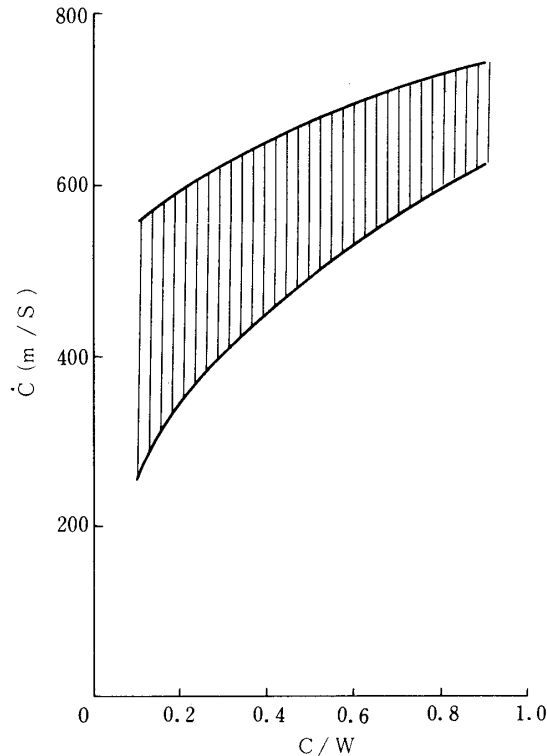
前述の液晶フィルムの色調変化から得られた熱境界前線より、後述の式を用いて、発生熱量 Q を求めた。この際、液晶フィルムの熱容量と温度変化に要する時間とは、夫々、非常に小さいと考えて各々無視し、又、熱は1次元流れと考え、クラック面からの熱損失は微小とした。

用いた式 [7] は、

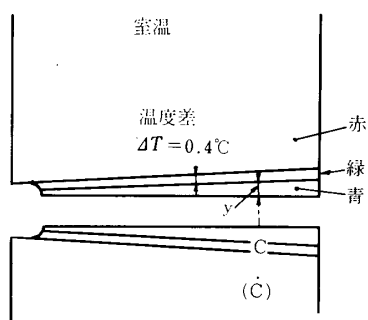
$$Q = \rho c \sqrt{4\pi kt} \cdot T \cdot e^{-\frac{y^2}{4kt}}$$

より、

$$Q = \rho c \sqrt{4\pi kt} \cdot \frac{\Delta T}{e^{-\frac{y_1^2}{4kt}} - e^{-\frac{y_2^2}{4kt}}}$$



第5図 クラック伝播速度曲線



第6図 熱境界前線形状(破断1.44秒後)

を誘導して、計算した。

ここに、

Q = クラック破面単位面積当りの発熱量

ρ = 密度 = $1.19 \times 10^6 \text{ g/m}^3$

c = 比熱 = $0.35 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$

k = 熱拡散係数 = $1.08 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

t = 破壊後の経過時間

ΔT = 赤/緑境界と 緑/青境界との熱境界前線の温度幅 = 0.4°C

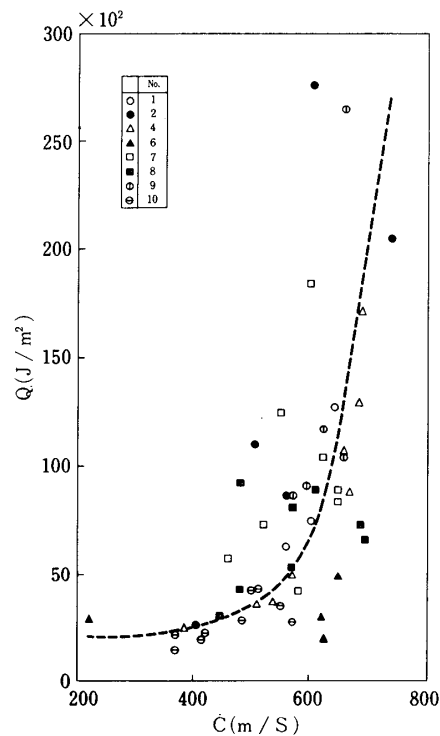
y_1 = 緑/青境界と破面との距離

y_2 = 赤/緑境界と破面との距離

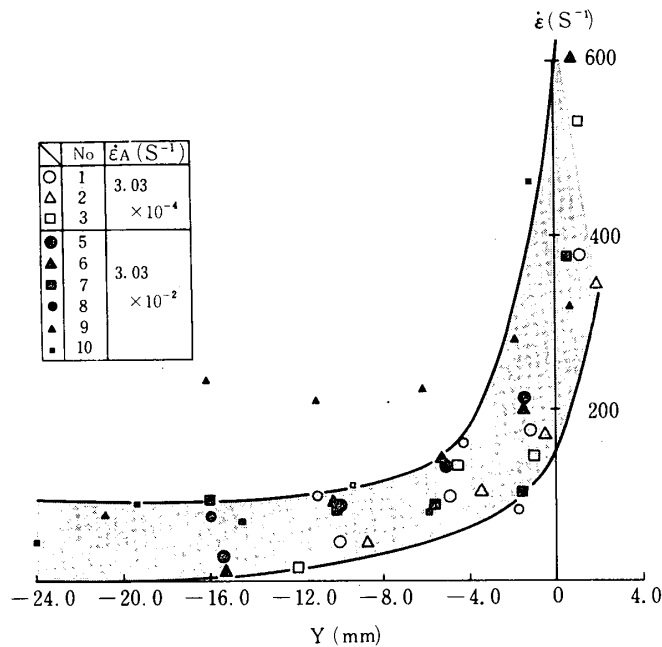
である。第7図は、このようにして求めた発生熱量 Q とクラック伝播速度 \dot{C} との関係である。

5. 考 察

粘弾性体内に、高速でクラック伝播がおこる時、進行クラック先端で、強いエネルギー集中が発生していることは、例えば第8図に見られるように、進行クラック先端での局所的歪速度 $\dot{\epsilon}$ が、巨視的歪速度 $\dot{\epsilon}_A$ に比べて遥かに大きいこと示される[1]。ここに Y = 進行ク



第7図 $Q \sim \dot{C}$ の関係



第8図 進行クラック先端での局所的歪速度

ラック先端からの距離，である。

先に行った Fuller, Fox & Field [5] の PMMA についての実験では，

- 1) クラック伝播速度 \dot{C} は，少なくとも 400 m/s 以上の高速域のみである。
- 2) 試験片寸法が，20 mm × 5 mm × 1.5 mm と極めて小型である。
- 3) 熱境界前線についての究明がない。

などが指摘される。本研究の結果得られた前掲第7図の $Q \sim \dot{C}$ 関係は，Fuller, Fox & Field の結果と同傾向であるが， Q が，200 m/s ~ 400 m/s は横ばい傾向で，以後 600 m/s あたりから，格段に増加し，又， Q の絶対値がより大きくなっている。

又，試験片幅中央付近でクラック径路より約 1 mm はなれた位置に 0.1 mm φ の鉄・コンスタンタン熱電対をつけ，温度測定を行って， Q を求めたが，データは第7図のばらつきの範囲内に入っていた。

熱境界前線は，前掲第6図に見られるように，略々，直線状を呈している。今後，更に究明の予定である。

謝 辞

東大宇宙航空研究所 小林研究室の山田 仁君の本研究への協力に謝意を表すものである。

1980 年 11 月 16 日 材料部

参考文献

- [1] 小林 昭, 宗村昌幸, 大谷信男, 第 22 回構造強度に関する講演会講演集, 日本航空宇宙学会, pp.248-251 (1980)
- [2] R.P. Kambour & R.E. Barker, J. Polymer Sci., A2,359-363 (1966)
- [3] J.R. Rice & N. Levy, in "Physics and Plasticity", ed. by A.S. Argon, M.I.T. Press, 277-293 (1969)
- [4] M. Parvin, Int'l J. Fracture, Vol. 15, No. 5, 397-404 (1979)
- [5] K.N.G. Fuller, P.G. Fox & J.E. Field, Proc. Roy. Soc. London, A.341,537-557 (1975)
- [6] A. Kobayashi, N. Ohtani & T. Sato, J. Appl. Polym. Sci., Vo. 18, No. 6,1625-1638 (1974)
- [7] H.S. Carslaw & J.C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", Oxford University Press, 259 (1959)