

準静的破壊における破壊の進展

湯瀬晶文 佐野雅己

東北大学電気通信研究所

〒980-77 仙台市青葉区片平2-1-1

1 はじめに

破壊現象と人間の付き合いは古く、人類が道具を持ち始めて以来と言つてよい。また私たちも、そのほとんどが様々なものを壊した経験を持っている。それだけに古来より破壊に対する関心は絶大であった。科学的にもグリフィス(1920)[1]の草分け的な基礎研究以後盛んに研究が続けられ、工学分野を中心に知識と経験の蓄積が行われてきた。しかしながら、科学的な破壊の研究の第一歩を記したグリフィスの研究の対象が静的な破壊であったにもかかわらず、これまでの破壊に関する実験的研究の多くは工学的な分野の主導で進められ、多層材料をはじめとした様々な条件に依存する特殊な材料における高速破壊がその対象であった。一方で本研究のような準静的な破壊は1931年の平田森三[2]以後ほとんど行われていない。

また、現在多くの分野で破壊の動力学と統計法則の理解・解明が急務となっている。その範囲は惑星科学や地震学におけるマクロな系から摩擦や結晶欠陥の運動、スティック・スリップ現象などのミクロな系に至るまで多岐にわたる。これに伴って、各分野で破壊の基礎的な研究に目が向けられ、その動力学や統計法則についての理解が進みつつあり、いくつかの理論やシミュレーションの結果も発表されている[3, 4, 5, 6, 7, 8]。

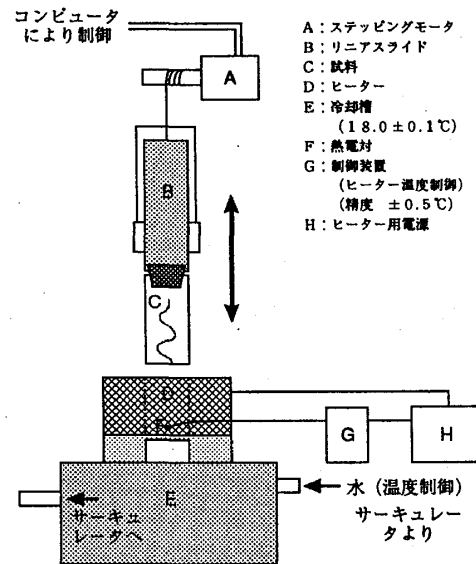
ここでは、こういった発表を念頭に置きつつ以下に述べるような準静的な破壊について、制御された環境下で実験を行い、亀裂の進展、振動、分岐の条件を明らかにし、破壊の動力学と多様なパターン形成の機構と法則を解明することが目的である。

2 実験系

一般に破壊現象は、ガラスのひび割れに見られるように不規則かつ制御不可能な高速の現象と思われている。しかし、我々の実験系においては、破壊に伴う亀裂の運動は制御可能である。我々は2次元的のみならず薄い試料に対して準静的な破壊の実験をよく制御された環境のもとで行った。図1は、その実験系である。ここでは熱応力を利用した準静的な破壊の実験系を構成した。準静的な破壊は、与えられる環境は単純でしかも試料の運動も一次元に限定されているにもかかわらず、そこから生じる破壊の形態は制御パラメータを変化させることによって大きく変化する。ここで制御パラメータとは、試料加熱用のヒーターと冷却用水槽の温度差(ΔT)および試料の冷却水槽中への降下速度(V)、さらに試料の幅(W)のことである。これらのパラメータによって、熱応力と破壊の進展速度を変化させることができる。

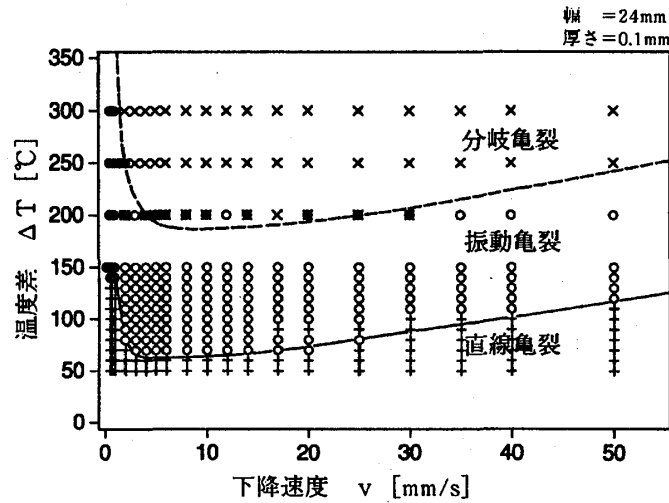
3 実験結果

制御パラメータの値を小さな値から次第に大きくしていくと、破壊によって生じるパターンは単純なものから複雑なものへと変化していく。我々はこれらを形状の単純なものから順に、直線的亀裂、振動亀裂、分岐亀裂の3種類に分類し[3]、図2に示すような ΔT と V に対する相図を得ることができた。この相図上で、直線的亀裂と振動亀裂の境界線に対して直線的亀裂の側から徐々に近づいていくと、亀裂パターンは減衰振動を示し、その振動の緩和時間は V でスケールリングされることが分かった[3]。次に制御パラメータの値が上記の境界線を越えて振動亀裂の領域



熱応力を利用して準静的破壊を行う実験系。破壊試料はヒーターで必要な温度まで加熱された後速度 V で冷却水槽の中へ降下していく。

図 1: 実験系



ΔT と V による相図。図中の実線と点線はそれぞれ直線亀裂と振動亀裂、振動亀裂と分岐亀裂の境界線を表す。

図 2: 相図

にはいると定常的な振動を示す亀裂が現れるようになる。このとき、制御パラメータを増大させるにしたがって振動の振幅は次第に大きくなって行くはずである。そこで、境界線に近い領域で ΔT を細かく変化させながら得られた振動亀裂の振幅をとっていくと図 3 のようになった。

図 3 から振動の振幅が ΔT でスケールされ、

$$\Delta T \rightarrow \frac{\Delta T - \Delta T_c}{\Delta T_c} = T_n$$

$$A \rightarrow \frac{A}{W} = A_n$$

という変換を行うと

$$A_n \propto T_n^{1/2}$$

という関係があることが分かる。また、理論の予想 [5] を確かめるために境界線に近い振動亀裂領域で W と熱拡散長 (l) の比 (W/l) に対する振動の波長の変化を調べたところ、振動の波長は W/l に依存することが分かった。その結果を図 4 に示す。ただし、この依存のしかたは定性的には理論的な予想に沿うが、定量的には約 2 倍のずれがあり一致しているとは言いがたい。

以上の結果は薄いガラスを用いた結果であり、アモルファス試料の破壊ということになる。ここではさらに単結晶シリコンを用いた破壊実験も行った。よく知られているように単結晶シリコンには他と比べて破壊されやすいへき開面があり、等方的とみなせるガラスの破壊とは異なる。しかし、準静的な破壊の結晶構造に依存しない一般性やシミュレーション結果との比較の点で単結晶シリコンによる実験は重要である。IC 製造用のシリコンウェハから切りだした試料を用いて実験したところ、直線的亀裂、振動亀裂、分岐亀裂に相当する結果を得ることができた。また、このとき生成された断面はシリコンのへき開面とは異なるものであった。ガラスの破壊の断面はなめらかで鏡面的であったが、単結晶シリコンの断面には破壊の進展に伴ってできたと思われるステップ状のパターンが形成されていた。このステップの間隔は 100 μm 程度であった。一方シリコンの破壊における V の値は 10 mm/s 程度である。したがって、ステップ状のパターンは少なくとも毎秒 100 ステップ程度が生成されていることになり、その破壊の進展の様子を捉えるには毎秒 10⁴ 回程度のサンプリングが必要になる。この速度は通常のビデオ録画では不可能であるのでより時間分解能が高い測定法として電気抵抗を利用した測定を行った。通常の準静的な破壊実験との違いはシリコンの試料に抵抗測定のためのアルミニウムを蒸着しておくこととその抵抗変化を捉えるための系を追加することである。その結果の一例が図 5 である。実際に実験できる試料の数がごく限られていることもあるが、はっきりとステップ形成との対応をとれる測定結果がまだ出ていない。図 5 にそれらしい小さな振動が見えるがその周期は試

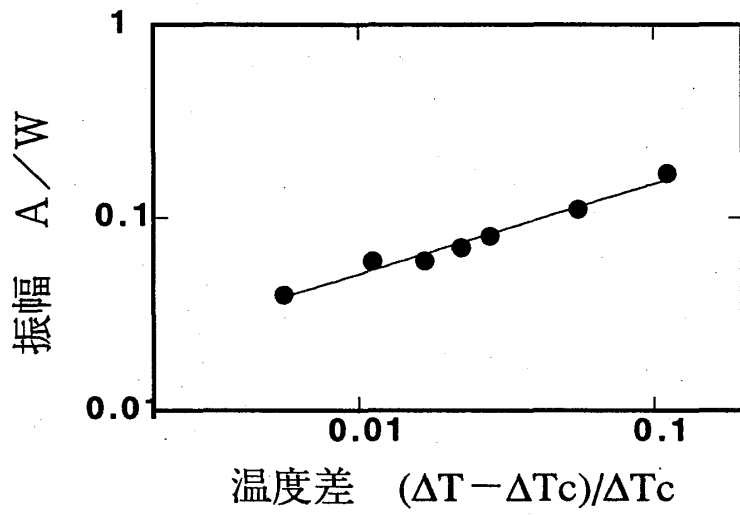
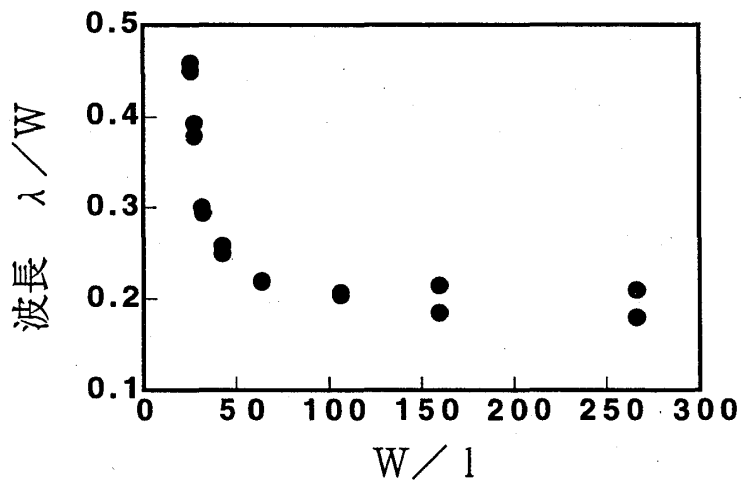


図 3: 温度差と振幅



試料の幅 W で正規化された波長 λ/W は、 W/l が小さい領域では大きく変化するが、 W/l が大きくなるとほぼ一定の値に落ちつく。

図 4: 波長の変化

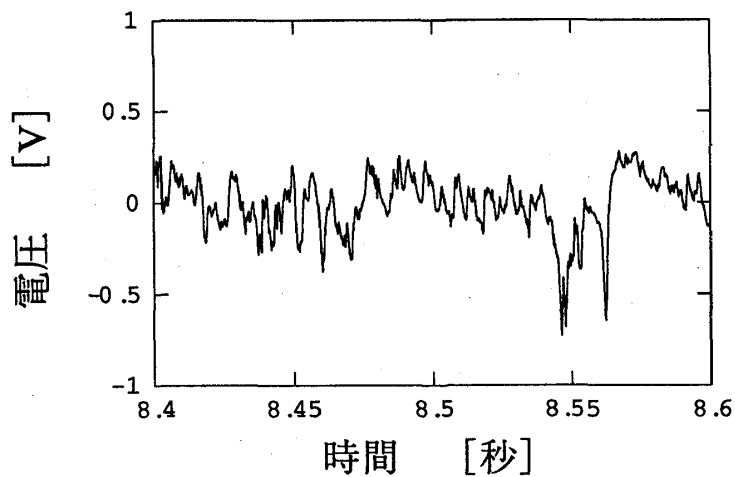


図 5: シリコン試料での測定結果

料が $100 \mu\text{m}$ 進む時間より短く、これが破壊断面のステップ形成に対応していると言うことはまだできない状況であり、今後の課題である。

4 まとめと課題

準静的な破壊の実験を制御された実験系で行い、そこから得られる亀裂パターンを直線亀裂、振動亀裂、分岐亀裂の3つに分類した。また、これらを用いて温度差と下降速度に対する亀裂パターンの相図を得た。相図の中での直線亀裂と振動亀裂の境界線付近では、いくつかのスケーリングを得ると共に振動亀裂の波長が試料の幅と熱拡散長の比に依存して変化し、この変化は定性的には理論の予想に沿うことが分かった。また、単結晶シリコンにより、準静的な破壊のパターンは試料の結晶状態に依存しないが、その破壊断面は両者で異なることが分かった。さらに、単結晶シリコンでの亀裂の進展の様子を捉えるために電気的な測定を行った。

高い時間分解能で亀裂の進展を捉えるためにアルミニウム蒸着により電気的な測定を行ったが、そこにはいくつかの問題点がある。これらの問題点を回避して信頼性のある測定をすることが今後の課題である。

参考文献

- [1] Griffith, A. A. Phil. Trans. R. Soc. **A221**, 163-198 (1920).
- [2] Hirata, M. Scient. Pap. Inst. phys. chem. Res. (Japan) **16**, 172-195 (1931).
- [3] A Yuse and M Sano, Nature **362**, 329-331 (1993).
- [4] S Sasa, K Sekimoto and H Nakanishi, Phys. Rev. E. **50**, 1733-1737 (1994).
- [5] M Adda-Bedia and Y Pomeau, Phys. Rev. E. **52**, 4105-4113 (1995).
- [6] M Marder, Phys. Rev. E. **49**, 51-54 (1994).
- [7] H. -A. Bhar and A. Gerbatsch, Phys. Rev. E. **A 52**, 240-243 (1995).
- [8] H Hayakawa, Phys. Rev. E. **49**, 1804-1808 (1994); Phys. Rev. E. **50**, 1748-1751 (1994).