

レーザを用いた積層ウエハの熱応力割断

金沢大学 理工研究域機械工学系
准教授 古本 達明
(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013212)

キーワード：積層ウエハ，熱応力割断，半導体レーザ

1. 研究の目的と背景

携帯型機器には多くの電子部品が搭載され、ガラス、サファイア、シリコンなどを母材とした薄板状脆性材料が使用されている。薄板状硬脆材料の分断は、速い加工速度、高い加工精度、マイクロクラックの発生を抑えた高い端面強度が要求される¹⁾。これまで、ダイシングやスクライビングによって分断されてきたが、マイクロクラックによる歩留まりの低下、加工液の併用による後処理工程の追加などが課題であった。

一方、機械的な分断法の代替として、レーザを用いた熱的な分断法が注目されている。材料表面にあらかじめ導入したき裂を制御しながら分断するレーザ割断は、取り代が不要で完全ドライプロセスで分断できることから、ダイシングやスクライビングに並ぶ有力な加工法の 1 つである。Lumley²⁾によって材料内部の熱応力場を利用したレーザ割断手法が紹介されて以来、ガラスやシリコンなど各種硬脆材料の割断特性が報告されている^{3,4)}。

本研究では、シリコンウエハ上にホウケイ酸ガラスが陽極接合された積層ウエハに対して、レーザによる高精度な熱応力割断技術を確立することを目的とする。熱源として円状のスポット径を有する半導体レーザを適用し、AE 波の測定と割断面に生じるき裂進展痕から積層ウエハの割断メカニズムを詳細に検討した。また、炭酸ガスレーザを同時照射することで割断品質の改善を試みたので、以下に報告する。

2. 実験方法

2.1 熱応力割断の原理

薄板状硬脆材料の表面にレーザ照射すると、レーザ照射部は急激に温度が上昇し、それに伴って熱膨張する。このとき、レーザ照射部は周囲の低温部分から拘束されるため圧縮応力場が生じ、その周辺には圧縮応力場と釣り合うように引張応力場が生じる⁵⁾。引張応力場内部では、応力がレーザ照射部を中心として円周方向に働くため、引張応力場にき裂の先端が存在すると、き裂はレーザ照射部の中心に向かって進展する。ここで、材料に任意の送り速度を与えてレーザ照射部を移動させると、き裂はレーザ照射位置に追従するように断続的に進展し、材料が分断できる。

2.2 レーザ

実験で使用するレーザは、波長が $0.808\ \mu\text{m}$ の半導体レーザ((株)日鐵テクノロジー製: NSDL-120)と波長が $10.6\ \mu\text{m}$ の CO_2 レーザ(SYNRAD 製: 48-1(s))である。いず

れも連続発振型であり、半導体レーザは焦点距離が $50\ \text{mm}$ 、 CO_2 レーザは焦点距離が $127\ \text{mm}$ の集光レンズを介して焦点を結ぶ。図 1 は、ビームプロファイラ((株)オフィールジャパン製: BeamStar FX-50)を用いて、半導体レーザのスポット位置でのプロファイルを測定した結果である。 CO_2 レーザはシングルモードであるのに対して、半導体レーザのビーム形状は楕円であり、スポット位置でのビーム径は $0.4 \times 4.1\ \text{mm}$ である。

2.3 積層ウエハ

実験では、結晶方位が(100)であるシリコンとホウケイ酸ガラスを陽極接合した積層ウエハを用いた。陽極接合部には、 $5\ \mu\text{m}$ 程度の共有結合層が存在している。積層ウエハを構成するシリコンおよびホウケイ酸ガラスの材料物性を表 1 に示す^{6,7)}。吸収係数は、近赤外分光光度計((株)パーキンエルマージャパン製: Spectrum ONE NTS)および顕微 FTIR イメージング装置(バリアンテクノロジーズジャパンリミテッド(株)製: Varian 3100 FT-IR)で透過率を測定し、ランベルトベールの式から求めた。表に示すように、ホウケイ酸ガラスはシリコンと比較して熱伝導率が著しく小さく、レーザ照射で生じた熱が周囲へ伝わりにくい性質を有していた。また、ホウケイ酸ガラスの吸収係数は、

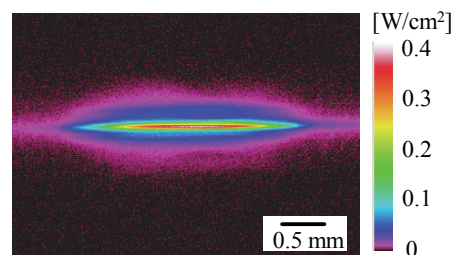


図 1 半導体レーザのビームプロファイル

表 1 積層ウエハの物性

材料	ガラス	シリコン
厚さ [mm]	0.4	0.35
密度 [kg/m^3]	2230	2329
ヤング率 [GPa]	64	130
線膨張係数 [$1/\text{K}$]	3.3×10^{-6}	2.6×10^{-6}
熱伝導率 [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]	1.2	156
比熱 [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]	980	713
吸収係数 [mm^{-1}]		
半導体レーザ [‡]	0.1	4.6
CO_2 レーザ [‡]	9.2	1.5

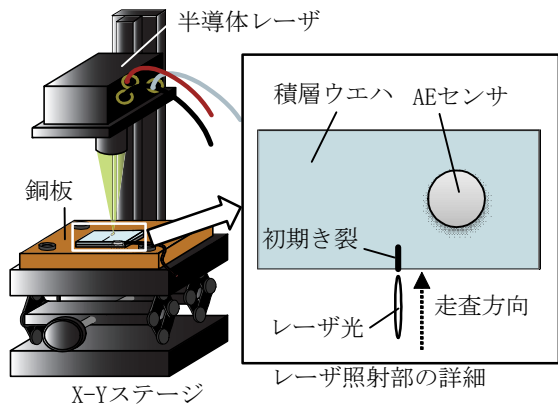


図2 実験方法概略

表2 実験条件

レーザー	半導体	CO ₂
波長 [μm]	0.808	10.6
発振形態	CW	CW
出力 [W]	60	2
ビーム径 [mm]	0.4×4.1	1.1×1.5
焦点距離 [mm]	50	127
走査速度 [mm/s]	2	2

半導体レーザーの場合 0.1 mm^{-1} 、CO₂レーザーの場合 9.2 mm^{-1} となった。ホウケイ酸ガラスの厚さは 0.4 mm であり、半導体レーザーはガラス内部を透過し、CO₂レーザーはガラス表面でほとんどが吸収されることとなる。一方、シリコンの吸収係数は、半導体レーザーの場合 4.6 mm^{-1} 、CO₂レーザーの場合 1.5 mm^{-1} となった。積層ウエハのシリコン厚さは 0.35 mm であり、半導体レーザーはシリコン内部で80%程度が吸収され、CO₂レーザーは40%程度が吸収されることとなる。

2.4 半導体レーザーによる切断実験

実験方法の概略を図2に、実験条件を表2に示す。積層ウエハは、シリコンの切断面が(0-10)面となるように $20 \times 10 \text{ mm}$ の大きさで切り出し、X-Y自動ステージ上に固定した銅板に対してホウケイ酸ガラスが上面となるように設置した。このとき、シリコングリス((株)サンワサプライ製: TK-P3S)を試料裏面に塗布し、積層ウエハと銅板を密着させた。初期き裂は、図3に示すように積層ウエハ断面のシリコン中央位置にピッカース圧子を押し込んで導入した。そして、試料中央位置を短手方向に分断するように切断を行った。

また、き裂進展時に発生する弾性波を観測するため、ガラス表面にAEセンサ((株)富士セラミック製: M5W)を貼付した。そして、半導体レーザーの長軸方向と走査方向を一致させながら、導入した初期き裂の上面を通るようにレーザーを走査した。加えて、積層ウエハの切断時に生じるAE波と比較するため、厚さが 0.5 mm であるホウケイ酸ガラス単層に対して垂直方向にCO₂レーザーを照射し、切断時に得

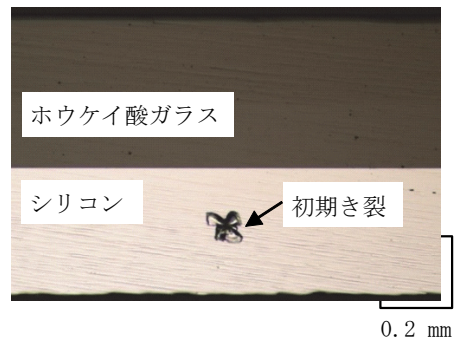


図3 シリコン端面に導入した初期き裂

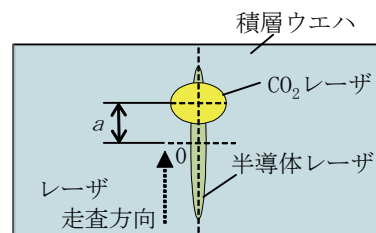


図4 マルチレーザーによる切断実験方法

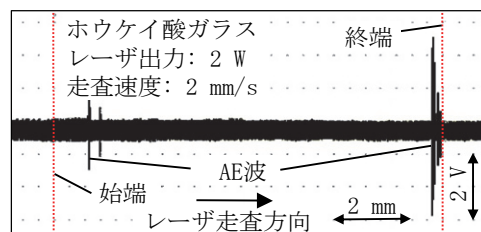


図5 ガラス単層切断時のAE出力波形

られるAEセンサからの出力を調べた。

レーザー照射後、積層ウエハの切断面および表面を光学顕微鏡((株)ニコン製: ECLIPSE ME600L)を用いて観察した。また、切断時に発生したAEセンサの出力から切断中のき裂先端の位置とレーザー照射位置との関係を求め、積層ウエハの切断メカニズムを調べた。

2.5 CO₂レーザーの併用による切断品質の改善

積層ウエハ終端部のき裂進展を改善するため、CO₂レーザーを併用しながらレーザー照射を行い、き裂進展に必要な入熱を補うことで切断品質の改善を試みた。図4に、レーザー照射部の詳細を示す。CO₂レーザーは、半導体レーザーの長軸方向に対して45度の角度で照射した。試料表面でのスポット径は $1.1 \times 1.5 \text{ mm}$ である。各レーザーの中心をそろえた位置を原点とし、レーザー走査方向に対する各レーザーの中心位置のずれ量を a と定義した。そして、半導体レーザーとCO₂レーザーの中心位置のずれ量を変えながら実験を行い、CO₂レーザー照射の有無による切断品質を比較した。

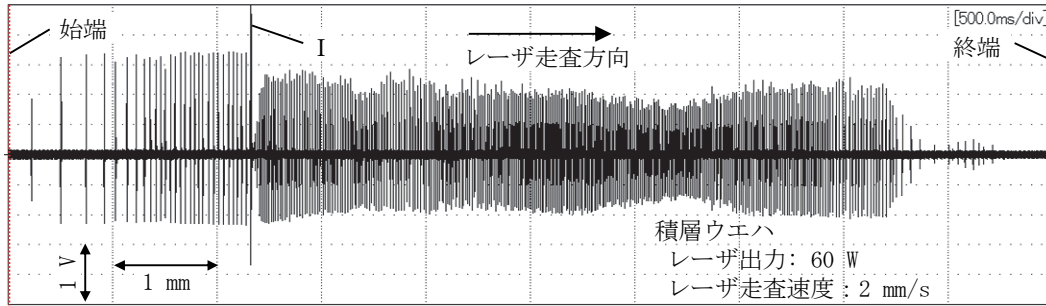
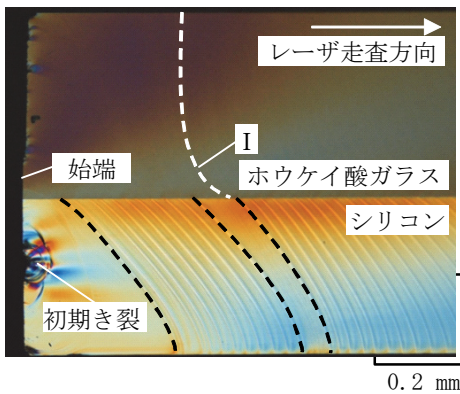
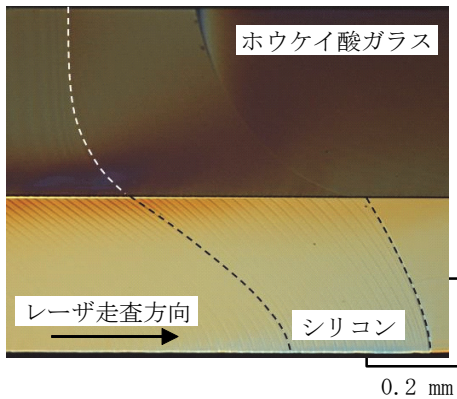


図6 積層ウエハ切断時の AE 出力波形



(a) 始端部



(b) 終端部近傍

図7 始端部および終端部近傍の切断面

3. 実験結果および考察

3.1 ホウケイ酸ガラス単層切断時の AE 出力波形

図5は、ホウケイ酸ガラス単層を切断したときに得られた AE 出力波形である。図中の点線は、ホウケイ酸ガラスの始端および終端を表している。AE 波は、始端部近傍で初期き裂からき裂が進展する時、大きなエネルギー解放ともなっており出力されたが、き裂が連続的に進展する試料中央部では出力が小さく測定されなかった。一方、AE 波はガラスの終端部近傍にも確認された。レーザを用いた切断で

はレーザ照射位置が先行し、これに追従するようにき裂が進展する。そのため、終端部近傍ではき裂進展に必要な応力場を形成する十分な入熱が得られず、き裂の進展が停止する。終端部近傍の AE 波は、き裂進展が停止した後に出力されており、ガラスの冷却に伴う自爆作用や曲げモーメントが作用したことによるき裂進展などが考えられる。

3.2 積層ウエハ切断時の AE 出力波形

半導体レーザを用いて積層ウエハを切断したときに得られた AE 出力波形例を図6に示す。AE 波は、試料始端部からのレーザ走査ともなっており出力され、始端部近傍では出力間隔が次第に短くなった。そして、図中 I で示す大きな AE 出力が得られた後は、振幅の増減を繰り返しながらほぼ一定間隔で AE 波が出力された。一方、終端部近傍では、AE 波の出力間隔が次第に長くなりながら出力が小さくなった。前述したように、ホウケイ酸ガラス単層では、試料中央部で AE 波が出力されなかった。したがって、積層ウエハ切断時に得られた AE 波は、シリコン内部のき裂進展方向である (0-10) 面にき裂が進展した時に出力されたと考えられる。

3.3 積層ウエハ切断面の観察

図7は、積層ウエハ切断面の始端部および終端部を光学顕微鏡で観察した結果である。図7(a)に示すように、始端部近傍にはシリコン内部のみでき裂が進展する領域が存在し、その後、き裂がガラス内部にも進展した。図6中の I で示した大きな AE 出力は、ガラス内部にき裂が進展し始めた位置であった。

切断初期のシリコン内部でのき裂進展は、各材料に対するレーザの吸収特性に起因していると考えられる。ガラス上方から照射されたレーザは、ガラス内部を透過してシリコン上面まで到達し、境界部から吸収されることとなる。そのため、シリコン上面が熱源となり、き裂進展に必要な十分な応力場が得られ、シリコン内部のみでき裂が進展したと考えられる。シリコン上面で生じた熱はガラス側にも伝導するが、表1で示したようにホウケイ酸ガラスの熱伝導率は著しく小さい。そのため、切断初期ではガラス内部にき裂が進展するための十分な応力場が得られなかったと考えられる。しかしながら、ガラス内部に対してもき裂が進展すると、レーザ照射による直接的なシリコンの加熱

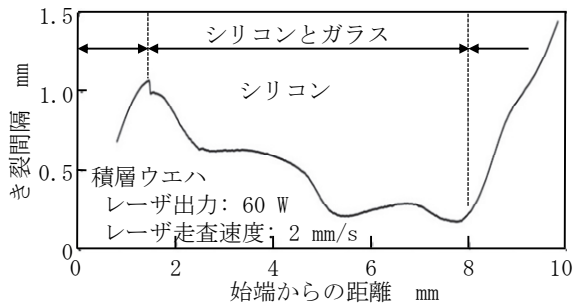


図8 始端からの距離とき裂間隔の関係

と、シリコンの加熱に伴うガラスへの熱伝導により、積層ウエハ全体にき裂が進展できる応力場が形成され、安定したき裂進展が得られたと考えられる。

一方、図8(b)は積層ウエハ終端部近傍を観察した結果である。始端部と同様に、シリコン内部のみでき裂が進展する領域が存在した。これもやはりレーザー照射で生じた試料内部の応力場に起因していると考えられる。半導体レーザーの走査方向に対する長径は4.1 mmである。そのため、始端から7.95 mmの位置を過ぎると、試料への入熱量が次第に少なくなる。ガラス内部でき裂進展が停止した位置とほぼ同じであり、十分な応力場が形成されなかったことが要因と考えられる。しかしながら、シリコン内部では少ない入熱量でき裂が進展することから、ガラスのき裂進展が停止した後もシリコン内部でき裂が進展した。これらの結果から、試料内部に形成される応力場は試料の熱伝導率に大きく影響を受けることが示唆される。

3.4 積層ウエハの切断メカニズム

試料始端から半導体レーザーのスポット位置までの距離と、進展したき裂間隔との関係を調べた結果を図8に示す。スポット位置が1.5 mmまでは、シリコンのみでき裂進展した領域である。この領域では、レーザー走査にしたがってき裂間隔が次第に大きくなった。これはガラス内部でき裂が進展せず、ガラスがシリコン内部のき裂進展に対する抵抗として作用したためである。レーザー走査によってシリコン内部のき裂が進展するにつれて、切断されていないガラスの領域は大きくなる。したがって、シリコン内部でき裂が進展するために必要な応力場を形成するため、よりレーザー照射にともなう入熱が必要となり、その結果き裂間隔が大きくなったと考えられる。しかしながら、き裂間隔が大きくなると先端に生じる応力も併せて増加するため、ガラスにき裂が伝ばする臨界値を超えガラス内部にもき裂が進展した⁸⁾。スポット位置が1.5 mmのとき、き裂間隔が急激に減少しているが、これはガラスにき裂が進展したことでき裂進展に対する抵抗が無くなったためである。

スポット位置が1.5 mmから8.0 mmまでは、積層ウエハ全体にき裂が進展した領域である。この領域では、増減を繰り返しながらき裂間隔が次第に小さくなった。前述したように、き裂が進展するためには臨界応力値を超える応力

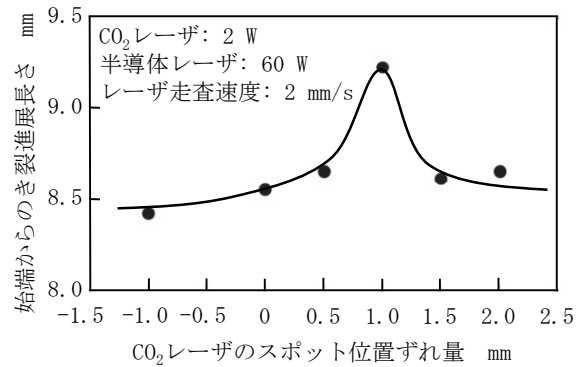


図9 CO₂レーザー照射位置とき裂進展長さ

場が必要となる。き裂間隔が大きくなると生じる応力も大きくなるため、き裂が進展する距離が長くなる。そして、一旦き裂が進展すると、次のき裂が進展するための臨界応力値に到達するための入熱が必要となる。き裂が進展するためには、き裂先端に生じる応力と臨界応力値に到達するための入熱時間が密接に関連しており、き裂間隔の増減はこれらの作用が交互に生じたためと考えられる。一方、次第にき裂間隔が小さくなったのは、レーザー照射にしたがって熱が試料内部に蓄積され、応力拡大係数が大きくなったためと考えられる⁹⁾。

スポット位置が8.0 mm以降は、再びシリコンのみでき裂が進展した領域である。この領域では、レーザー走査にしたがってき裂間隔が次第に大きくなった。これは、ビーム形状に起因してレーザー照射にともなう入熱量が次第に減少すること、および終端部のエッジ効果によりレーザー照射部とその周辺に形成される温度差が小さくなり、き裂が進展できる応力場が形成されにくくなったことが原因であると考えられる。

これらの結果から、積層ウエハの切断は、レーザー照射にしたがって各試料内部に形成される応力場と、各試料の機械的物性および熱的物性とが密接に関連しながら行われることが明らかとなった。また、シリコンに対して吸収特性が優れた半導体レーザーを用いることで、レーザー照射による直接的なシリコンの加熱と、シリコンの加熱に伴うガラスへの熱伝導により、各試料に対して同時にき裂を進展させることが可能であることがわかった。

3.5 CO₂レーザーの併用による終端部切断品質の改善

各レーザーのスポット位置のずれ量 a と始端からき裂が進展した距離との関係を調べた結果を図9に示す。半導体レーザーのみの切断では、前述したように始端から7.9 mmの位置でき裂が停止したが、CO₂レーザーを併用することでガラス内部のき裂進展距離が長くなった。CO₂レーザーがガラス表面で吸収されることで終端部近傍の入熱量が増加し、ガラス内部でき裂が進展できる応力場が形成されたためである。また、レーザー走査方向に対してCO₂レーザーが前方にある方($a > 0$)でき裂進展距離は長くなった。CO₂レーザー

を前方で照射することで、あらかじめガラス内部が温度上昇して応力場が形成され、半導体レーザーで形成される応力場と相まってき裂の進展性が向上したためである。また、 $a=1.0\text{ mm}$ のときき裂進展距離が最大値となった。これらの結果から、半導体レーザーとCO₂レーザーを併用することで切断距離が伸び、切断品質が改善できることがわかった。

4. 結 言

本研究では、シリコンウエハ上にホウケイ酸ガラスが陽極接合された積層ウエハに対して、半導体レーザーを用いた高精度な熱応力切断技術を確立することを目的として、き裂進展時のAE波を測定すると共に、AE出力から切断中のき裂先端の位置とレーザー照射位置との関係を求め、積層ウエハの切断メカニズムを詳細に検討した。また、積層ウエハ終端部のき裂進展を改善することを目的として、CO₂レーザーを併用しながらレーザー照射を行い、き裂進展に必要な入熱を補うことで切断品質の改善を試みた。得られた結果を以下に示す。

- (1) 積層ウエハ切断時のAE波は、き裂進展時のエネルギー解放に起因してシリコン内部でき裂が進展する時に出力される。
- (2) 半導体レーザーを用いた積層ウエハの切断は、レーザー照射による直接的なシリコンの加熱と、シリコンの加熱に伴うガラスへの熱伝導により、各試料に対して同時にき裂を進展させることが可能である。
- (3) 切断初期では、シリコンとホウケイ酸ガラスのレーザー吸収特性および熱物性の違いにより、シリコン内部のみでき裂が進展する領域が存在する。しかしながら、レーザー照射による十分な入熱が行われるとホウケイ酸ガラス内部にもき裂を進展させることができる。
- (4) 積層ウエハ内部のき裂進展は、き裂先端に生じる応力と臨界応力値に到達するための入熱時間が密接に関連し、これらにしたがってき裂間隔が増減を繰り返しながら進展する。

- (5) CO₂レーザーを併用しながら切断することで、半導体レーザー単体では不足していた試料終端部近傍の入熱量を増加させることができ、半導体レーザー単体と比較して切断距離を伸ばすことが可能である。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成(AF-2013212)を受けて実施したことを付記すると共に、記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 八幡恵輔・清水政二・村上政直：レーザーを用いたガラス基板の分断技術，レーザー加工学会誌，22-1 (2015) 25.
- 2) R. M. Lumley: Controlled Separation of Brittle Materials Using a Laser, The American Ceramic Society Bulletin, 48-9 (1969) 850.
- 3) 黒部利次・川向徳康・高尾利幸：YAG レーザによるガラスの精密切断，材料，42-479 (1993) 1004.
- 4) 黒部利次，市川和浩，永井久司：YAG レーザによるシリコンウエハの切断，材料，44-497 (1995) 159.
- 5) 今井康文・森田英毅・高瀬徹・古賀博之：ぜい性材料の熱応力による切断加工の可能性，日本機械学会論文集 (A編)，55-509 (1989) 147.
- 6) 日本工業規格，JIS R 3802(1995) 2.
- 7) S. M. Sze and Kwok K. Ng: Physics of Semiconductor Devices, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, (2007) 790.
- 8) 山田啓司・西岡真吾・細川晃・上田隆司：パルス YAG レーザによる脆性材料の切断加工，精密工学会誌 69-1 (2003) 120.
- 9) 沢田博司・今井康文・才本明秀・山本良之：線熱源による切断におけるき裂進展挙動，精密工学会誌 66-7 (2000) 1135.