

空気吹き付けによる熱応力割断のき裂進展制御

本村文孝*・今井康文*
才本明秀*

Control of a crack path by air blowing in the thermal stress cleaving

by

Fumitaka MOTOMURA*, Yasufumi IMAI*
Akihide SAIMOTO*

In the case of unsymmetrical thermal stress cleaving, cracks will not grow straight because mixed mode of stress intensity factors arises. To realize the thermal stress cleaving as a standard cutting process, this point has to be overcome. One solution may be cooling by the air blow combined with heating. Cooling reduced both of stress intensity factors, K_I and K_{II} . But the latter reduction is more than the former. In this paper, stress intensity factors are estimated for unsymmetrically edge-cracked rectangular glass plates by FEM and the variation of the ratio of K_{II}/K_I is discussed as a function of the cooling location, cooling area and initial plate temperature.

1 緒言

ガラスのような脆性材料の加工法として熱応力割断が使用されるようになった。液晶やPDP基板として利用されるガラス薄板は大型化しており、生産性の面からも新しい加工法の研究がなされている。従来の面落し等にはガラス切りが使用されており、引っかかりおよび曲げ負荷時のチッピングによる傷が品質上問題となっている。その点熱応力割断は非接触であり、切り屑を生じないので歩留まりの向上が期待できる。

但し、熱応力割断においても克服すべき課題があり、端面近傍の割断はその一つである。非対称線の割断では、き裂進展が混合モードになり進展経路は湾曲する。研究室では単一加熱源による端面と平行な割断を試みており、熱源を直線上ではなく曲線上に移動させてみたが、湾曲を抑えるのは困難であった。そこで、加熱すると同時に空気吹き付けによる冷却を行ったところ、き裂の湾曲を抑える可能性があることが分かった。これは常に非定常状態を作り出すことに等しく大きなモードIの熱応力拡大係数が期待でき、極端な温度上昇が制限される場合にも利用されると考えられる。

本研究では、まず始めに端部近傍に自由縁と平行な静止き裂の先端近傍に点加熱がある場合に、任意位置に空気吹き付けされたときの混合モード下の応力拡大係数を有限要素法によって評価し、吹き付け流量および吹き付け開始時間について検討した後、実際の加熱条件となる領域加熱した場合において、吹き付け面積、初期ガラス温度の影響について述べる。

2 解析方法

解析モデルを図1に示す。長手側縁と平行な縁き裂を有する矩形薄板を考え、き裂前方5[mm]に点加熱あるいは円加熱が作用するとき、き裂延長線上より縁側に空気吹き付け中心がある場合の2次元非定常熱弾性解析を行った。

計算に使用した強制対流熱伝達係数⁽¹⁾は、予加熱されたガラスに衝突噴流があるときのガラス表面温度の温度測定より、数種の体積流量について求めた。解析に際し、熱的条件は次のものを使用した。

1. 空気吹き付けが無い場合の自然対流熱伝達係数は両面から生じる。

平成12年4月21日受理

*機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

- 2. 空気吹き付けによる強制対流熱伝達係数は片面から作用する。
- 3. 端面からの放熱は無視する。
- 4. き裂面は断熱である。

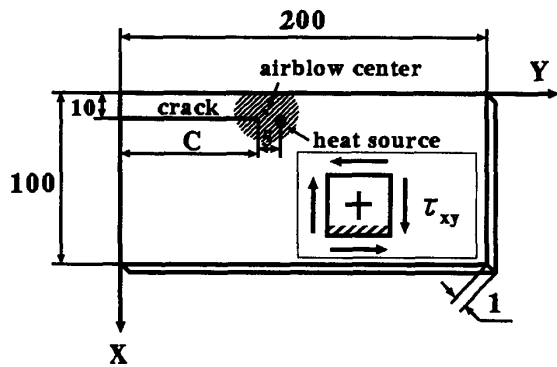


Fig.1 Analytical model

次に要素分割について、図2にき裂長さ50 [mm] の場合の分割例を示す。8節点アイソパラメトリック要素を使用し少ない要素数で精度を保てるように工夫した。図2の例では総要素数828、総節点数3431になった。

また応力拡大係数は変位外挿法を利用し、時間ステップ (0.1 [sec]) 毎の温度場解析および応力場解析より求めた。図1の座標系では、正の K_{II} に対してき裂は自由縁側に屈曲する。 K_I が大きく、 K_{II} が小さい程、き裂進展の湾曲が抑えられると考える。

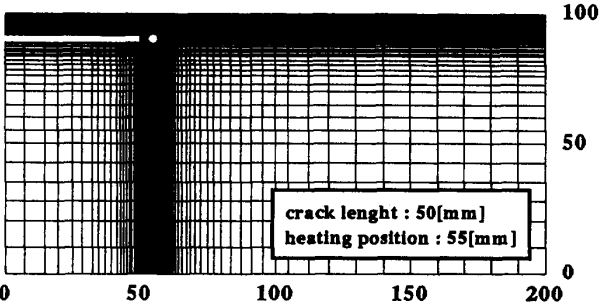


Fig.2 FEM model

解析に使用したガラスの材料定数を表1に示す。

Table.1 Material properties

Thermal conductivity	λ [W/m K]	1.03
Poisson ratio	ν	0.3
Young modulus	E [GPa]	69.2
Linear expansion coefficient	α [1/K]	8.3×10^{-6}

3 解析結果

3.1 点加熱と空気吹き付けの場合

点加熱の場合、空気吹き付けの影響を受ける範囲がガラス全体に及ぶ場合について解析を行った。

まず、加熱と同時に空気吹き付けを行わず、ある程度時間が経過した後 (5 [sec], 10 [sec], 15 [sec]) 空気吹き付けを始める。この場合、吹き付け位置によって K_{II}/K_I の値は変化する。図3は其中で最小の K_{II}/K_I を与える吹き付け位置に対して、吹き付け後の K_{II}/K_I の時間的変化を示したものである。

全ての加熱経過時間について、吹き付け時間が長くなるにつれて、 K_{II}/K_I は減少している。これよりき裂進展進展に必要な K_I が与えられさえすれば、空気吹き付けによって、き裂進展直進性は高まると言える。

さらに、同じ吹き付け経過時間ならば、加熱経過時間が短い程小さな値を示しているので、自由縁近傍のような混合モード状態下では、十分に加熱するのではなく、加熱と同時に、吹き付けを開始することが有効であると思われる。

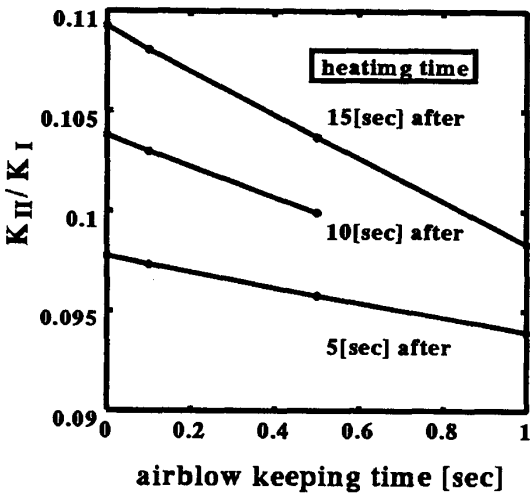


Fig.3 Airflow timing

3.2 領域加熱と空気吹き付けの場合

点加熱の場合の結果を踏まえた上で、今後の解析は加熱開始と同時に吹き付けを開始した場合について行う。またガラス全面に吹き付けの影響が反映されると、加熱源自身のエネルギーも奪ってしまうので、吹き付け面積に制限を設けた場合も検討する。

解析条件は次の通りである。

加熱源半径	1.5 [mm]
加熱量	15 [W]
き裂長さ	100 [mm]
加熱源中心位置	105 [mm]
自由縁からの距離	10 [mm]
空気流量	0.33 [m ³ /sec]

3.2.1 吹き付け経過時間について

図4は吹き付けの有無による応力拡大係数の時間的変化の違いについて示している。吹き付け半径は1.5 [mm]、吹き付け中心位置は $X=8.5$ 、 $Y=104.5$ である。

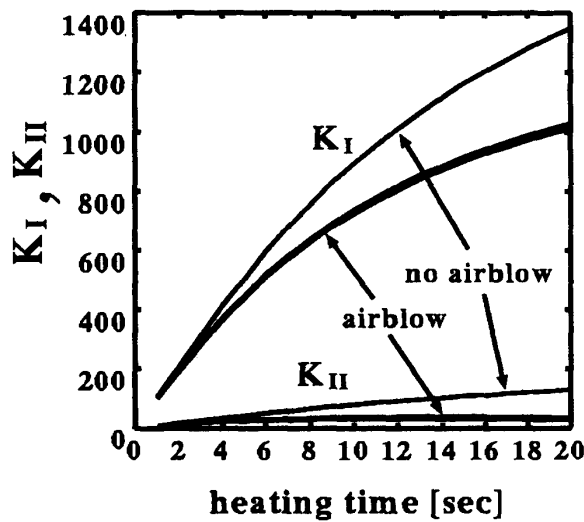


Fig.4 K_I , K_{II} vs heating time

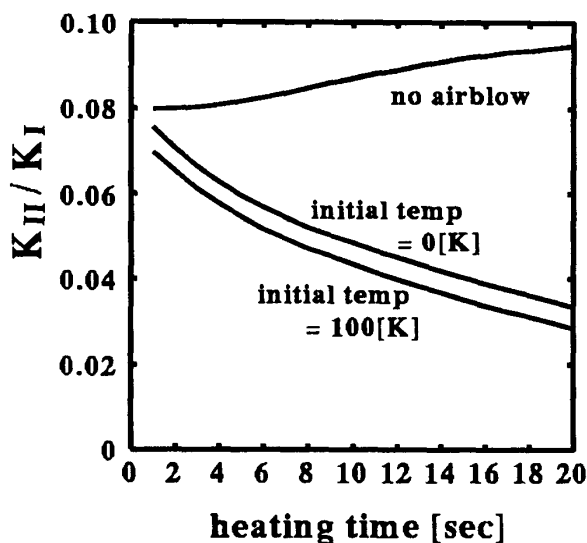
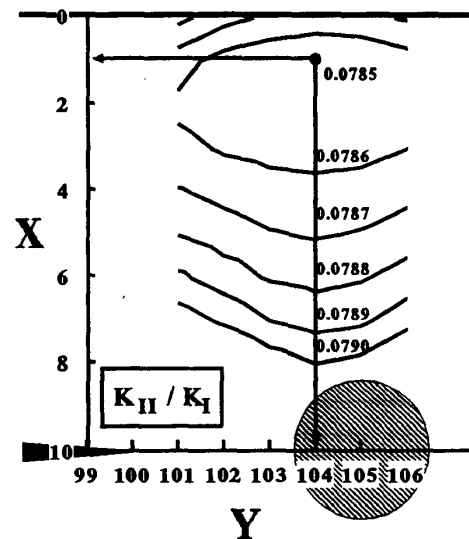


Fig.5 K_{II}/K_I vs heating time

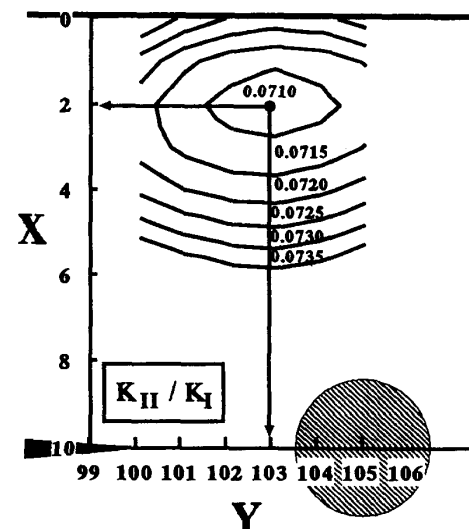
空気吹き付けが無い場合に比べて、同じ加熱量15Wでは、 K_{II} 、 K_I 共に減少している。しかし、加熱量を

増加することで、き裂進展に必要なレベルまで高めることは可能である。そこで、混合モード下におけるき裂の直進性を議論するには任意時間における K_{II}/K_I の値が大切となる。図5に K_{II}/K_I の時間的変化について示す。

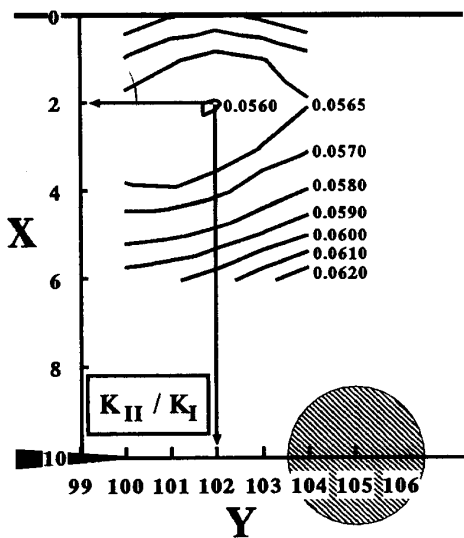
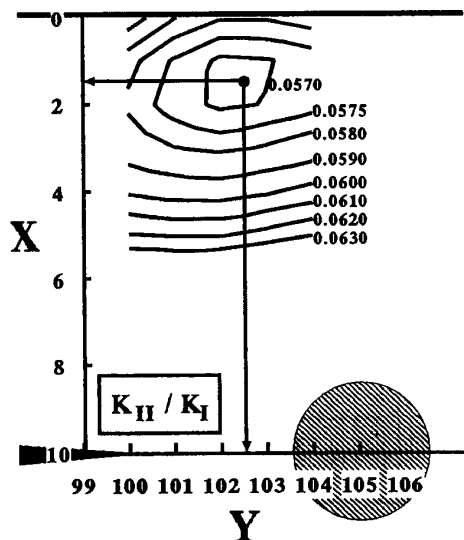
吹き付けが無い場合は時間と共に単調増加傾向にあり、時間をかけないで割断する、つまり高い加熱量を瞬時に与えることで、き裂の屈折を抑えることになるが、材料表面の溶融は避けられず最適な方法とは言えない。一方、加熱と同時に吹き付けを開始した場合は吹き付け直後から減少していることがわかる。また、ガラスの初期温度と周囲温度との差を0 [K] から100 [K] に高めることで0 [K] の時よりも減少量が増した。これより初期温度を高め設定し、より局所的な温度勾配を与えることで、き裂湾曲を抑える効果が十分期待できる。



(a) $t_0 = 0$ [K] heating time 2 [sec] after



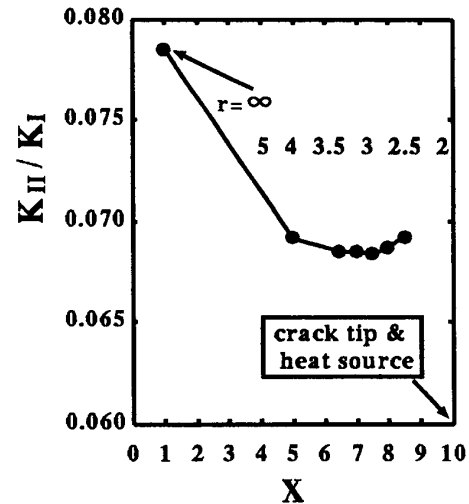
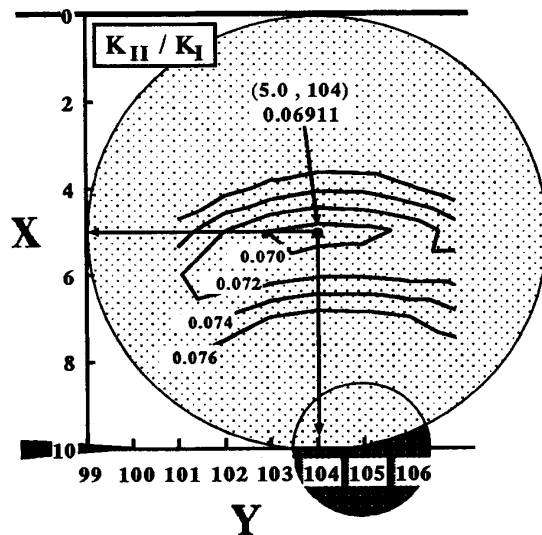
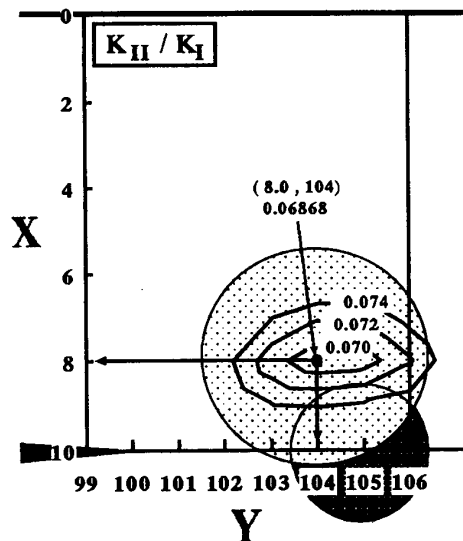
(b) $t_0 = 0$ [K] heating time 10 [sec] after

(c) $t_0=100$ [K] heating time 2 [sec] after(d) $t_0=100$ [K] heating time 10[sec] afterFig.6 The trajectory of airflow center giving the same K_{II}/K_I

3.2.2 吹き付け面積の影響

図6は K_{II}/K_I の同一値を与える吹き付け中心位置を結んできた等強度線である。吹き付け条件はガラス全面に吹き付けの影響が及ぶ場合である。(a)(b)は初期温度と周囲温度との差が0 [K]、(c)(d)は100 [K]、吹き付け経過時間2 [sec] と10 [sec] である。共通して言えることは、初期温度と吹き付け経過時間に関わらず、 K_{II}/K_I が小さくなる範囲はき裂先端と加熱源の間の加熱源から離れた自由縁側にあることである。初期温度0 [K] については、時間経過により、 K_{II}/K_I の小さくなる範囲が絞られてきている。

次に、図7は吹き付け半径を変化させた時に、最小の K_{II}/K_I を与える最適吹き付け中心位置の移動化について示している。吹き付け経過時間は2 [sec] 後

Fig.7 The optimal airflow center giving the minimum K_{II}/K_I (a) $t_0=0$ [K] cooling radius=5.0 [mm](b) $t_0=0$ [K] cooling radius=2.5 [mm]Fig.8 The trajectory of airflow center giving the same K_{II}/K_I

である。まず、Y 方向位置は常に104 [mm] であった。吹き付け半径が小さくなるにつれて、最適位置の X 座標が加熱源に近付いており、各半径における K_{II}/K_I の最小値も小さくなる傾向にある。

図 8 は吹き付け半径が5 [mm]、2.5 [mm] のときの、 K_{II}/K_I の同一値を与える吹き付け中心位置を結んでできた等強度線である。これらより、吹き付け領域の外周が加熱源中心を通過するような位置に K_{II}/K_I を最小とするような吹き付け中心位置があることがわかる。

実用的には吹き付け面積を小さくし、加熱源と隣り合うように配置することで、種々の自由境界に対応したき裂進展経路の制御に適用できるのではないかと考える。

4 結 言

1. 空気吹き付けによって K_{II}/K_I が減少することが明らかになり、空気吹き付けが端部に平行な熱応力割断に有効であることが分かった。
2. 周囲温度より初期ガラス温度を高めることで、 K_{II}/K_I をより減少させることができる。
3. 空気吹き付け面積を狭めることで、 K_{II}/K_I は減少し、最適吹き付け中心位置は加熱源に近づくことが分かった。

参考文献

- (1) 本村、今井、才本、長崎大学工学部研究報告、29、52、(1999)、11.