

振動モードを利用した長方形 FPD ガラスの非接触割断加工* (長方形ガラスにおける加工条件の検討)

森田英俊**, 林田興志郎***

Non-Contact Cutting Technology of Rectangular FPD Glass Using Vibration Modes (Study of Processing Conditions in Rectangular Glass)

Hidetoshi MORITA**, Koushiro HAYASHIDA***

Abstract

In recent years, the demand of the glass for FPD has been increasing. Therefore, the development of new cutting technology with higher manufacturing efficiency is desired.

Generally, there are two processes in FPD glass cutting. The first process is to scribe on the glass by laser or wheel cutter. Next process is to cut the glass along the scribe line by bending stress. In this process, the glass is cutting by running a rubber roller along the scribe line. Particularly, in the case of thin glass for touch panels made by non-contact scribing, it becomes contact cutting in break process. In other words, the technique of cutting with non-contact in break process is demanded.

Therefore, by using tensile stress generated by the loop of the vibration mode, we hypothesized that glass can be cut in a non-contact way. This study reports, the result of examining a cutting method of rectangular glass.

Key Words: FPD Glass, Vibration Mode, Cutting Technology, Non-Contact Processing

1. 緒言

近年、ガラスをはじめとする脆性材料は、産業界における多種多様な分野で広く必要とされている。例えば、年間 1 億 7000 万台生産されているという薄型テレビ市場である。これらの需要が増加し、それに伴った低価格化によりその規模は年々拡大している。また、スマートフォンやタブレット端末なども家庭や企業に広く普及してきている。そのため、これらの製品に付随する FPD (Flat Panel Display) 用ガラス基板の需要とそれを加工する機械の高効率化が強く求められている。

ガラスの割断には、レーザやスクライビングホイールによってガラスの厚さ方向にスクライブ線(けがき線)を入れ、そのき裂を深さ方向へ進展させるように曲げ応力を加え、ガラスを割る方法が主流である⁽¹⁾。現在、スクライブ加工後に、割断するための方法としては、硬質のゴムローラをスクライブ線上に押し当てながら走査させる方法があるが、格子状に割断(クロスカット)させるためには、材料を 90° 回転させる必要がある。その際、薄い板厚 (t0.3mm 以下) のガラスは、回転の際の慣性力によって、まれに破損してしまうことがある。そのため、この工程を省略出来れば、より高速・高精度の加工法になりうると考えられる。

そこで、現在の加工方法よりも効率的にクロスカットを行うために、共振周波数付近の振動モードの腹の起伏を利用して、スクライブを深さ方向に成長させる手法を考案した⁽²⁾。

この方法では、一度にクロスカットできる可能性

があるため、材料を 90° 回転させる必要がなく、工程を減らし、材料の破損の防止にもつながるのではないかと考えている。また、ガラスに振動を伝える際に音波を用いることで、非接触な加工法となるので工具摩耗や洗浄工程時のコスト削減にもつながると考えられる。特に薄板ガラスのスクライブ工程では、レーザによる非接触加工であるにも関わらず、割断工程で接触加工となっているため、非接触化が求められている⁽³⁾。

そこで本研究では、これまでに音波加振によってクロスカットに適した振動モードを FEM 解析と実験から選定し、正方形ガラスを非接触クロスカットする実験を行い、精度よく割断できることを確認した⁽⁴⁾。そのため、本研究の目的は、実際に使用されている長方形ガラスの非接触クロスカットに適した振動モードの選定とその方法について検証することである。

2. 従来技術と振動モードによる割断加工

2.1 FPD 用ガラスの割断技術

ガラスの割断方法としては、割断によるものが主流である。その加工方法は、ガラスの厚さ方向にスクライブ線(けがき線)を入れ、その線上に沿って機械的に曲げ応力を加えることでガラスを割断する 2 つ工程から構成されている。つまり、図 1 のよう

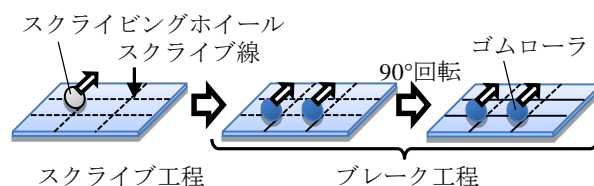


図 1 スクライビング工程とブレイク工程

* 原稿受付 平成 26 年 11 月 1 日

** 佐世保工業高等専門学校 機械工学科

*** 日本精工株式会社

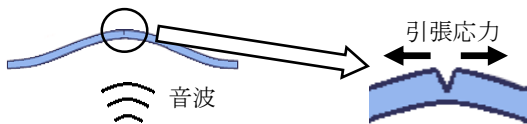


図2 振動モードを用いた切断方法の原理

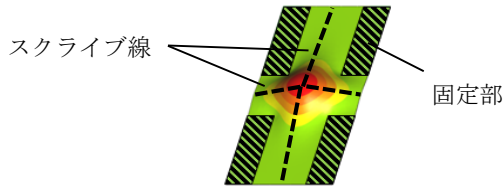


図3 本研究における切断方法

にガラスにけがき線を入れる工程(スクライプ工程)と、そのけがき線に沿ってガラスを押し割る工程(ブレイク工程)がある。

スクライプ工程ではスクライピングホイールと呼ばれる工具を用いるのが一般的な方法である⁽¹⁾。

ガラスのブレイク工程では、スクライプ工程によって発生したけがき線上に応力を加えることで、き裂をガラスの厚さ方向に成長させて切断する。このときの応力を加える方法として現在最も一般的な方法は、図1のように硬質のゴムローラをスクライプ線上に押し付け、走査させる方法である⁽²⁾。しかしこのように応力を加えるためには、ゴムローラを正確にスクライプ線上で走査させる必要があることや、クロスカットする際に材料を90°回転させる必要があるなどの問題点がある。

また、近年スクライプ工程においては、レーザを用いた非接触加工も行われており、ブレイク工程においても非接触で行なえる手法が求められている⁽³⁾。

2.2 振動モードを利用したクロスカット加工

これまでの研究でガラスを共振周波数で加振すると、それに対応する振動モードで振動するため、図2のように、腹の部分にスクライプ線を合わせることで、ガラス表面に引張応力が作用し、スクライプを厚さ方向に成長させ、切断できることを確認した⁽²⁾。また、昨年度の研究で、正方形のガラスに合成波で共振させる事で、ガラスを90°回転させることなく一度にクロスカットでき、切断加工の生産効率を高められる可能性を示す事ができた⁽⁴⁾。

そのため、図3のように長方形ガラスの四隅を拘束して音波加振し、スクライプ線上に沿ってクロスカットする方法を検証する。

3. 実験および実験結果

長方形ガラスをクロスカットする手段として、工程をいくつかに分けて切断する方法と合成波による切断方法を考案し実験を行った。ここでは、その方法と結果について述べる。

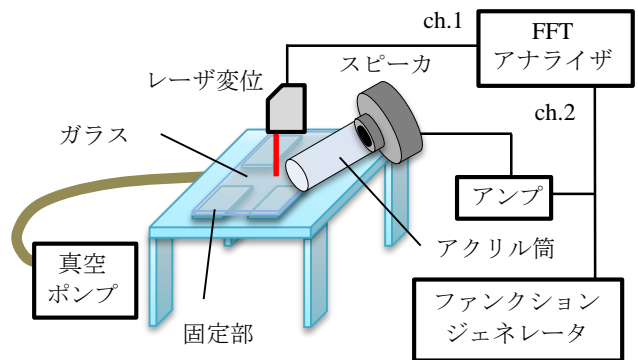


図4 実験装置概略図

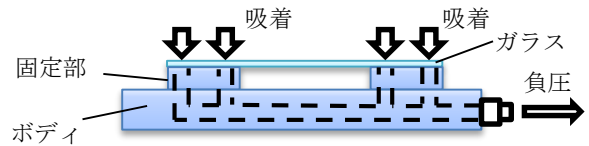


図5 固定装置の概略図

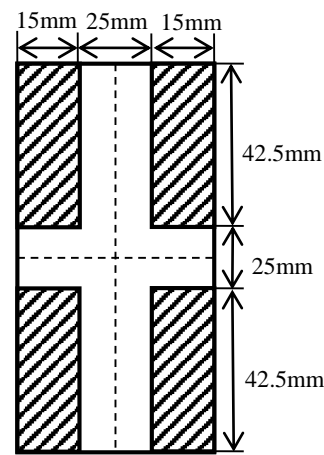


図6 実験モデル

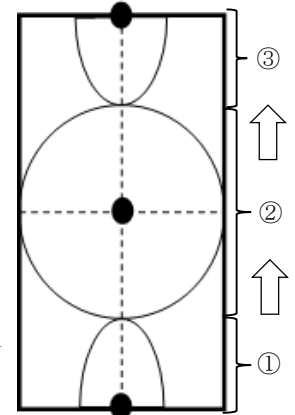


図7 切断工程

3.1 実験装置

図4に示すような実験装置を用いて実験を行なった。ガラスの加振方法にはスピーカーから発生させる音波を用いる。スピーカーには、ファンクションジェネレータからの正弦波を、アンプで増幅して入力する。スピーカーの先端には、アクリル製の筒を取付け、その先端を加振部に設置する。ガラスの振動振幅測定には、レーザ変位計を用いた。

また、ガラスの拘束には、図5のように真空ポンプでガラスに対して負圧をかけて吸着させた。

3.2 3工程による切断法の検証(両端部と中心部加振による方法)

これまで、正方形ガラスの切断方法について検証や実験を行ったが、実際のスマートフォンやタブレットに使用されているガラスサイズは長方形である。

表 1 ソーダライムガラスの物性値⁽⁵⁾

ヤング率 [MPa]	減衰比 [%]	ポワソン比	密度 [kg/m ³]
46611.8	3.24	0.23	2200

表 2 加振時間を考慮した割断結果

実験 番号	割断状況		
	二分割	三分割	クロスカット
1	-	縦左○	-
2	-	縦左○	-
3	縦○	-	-
4	縦○	-	-

そこで、図 6 に示す長方形ガラスを、3 工程に分けて割断する方法を検証する。図 7 に割断工程の概略図を示す。黒点は各割断工程における加振点を、破線はスクライブ線を示している。最初の工程では、端部を加振し、ストレート領域のき裂をクロスカット領域まで進展させる。次の工程では、中心部を加振してクロスカットする。最後の工程では、残りのき裂を端部まで進展させる。

3.2.1 FEM による振動モード解析

図 6 に示すモデルにおいて、き裂進展に適した振幅形状の振動モードを決定するために、FEM による振動モード解析を行った。解析には Pro/ENGINEER (Mechanica) を用いた。拘束条件は、全方向完全固定とし、加振力は 1N とした。解析に用いた材料はソーダライムガラスで、その物性値を表 1 に示す。

図 8 に、FEM 解析から得られたモード毎の振幅形状を示す。(a)~(c)の順に割断前、き裂進展後、残りの割断とガラスを割断するのに適した振動モードを選定した。

3.3 加振時間を考慮した割断実験と実験結果 (3 工程)

FEM 解析の結果より、最初の工程は 3 次モードの共振周波数で加振し、次の工程では 1 次モードの共振周波数、最後の工程で 6 次モードの共振周波数で加振すると、ガラスをクロスカットできると考えた。このとき入力信号の振幅は 5V で、アンプの増幅率は 17.7dB となっている。また、昨年度の割断実験において、ガラスが割断するまでにかかった時間が 2s 付近であったため、まずは加振時間を 5s として加振した。

加振時間を考慮した割断実験結果を表 2 に示す。また、表 2 で示した割断状況を図 9 に示す。表 2 より、ガラスは 2 分割や 3 分割なるなど不安定な結果であった。これは最初の端部加振の際に、き裂が止まることなく反対側の端部まで進展したため、2 分割になり、固有振動数が変化したためであると考え

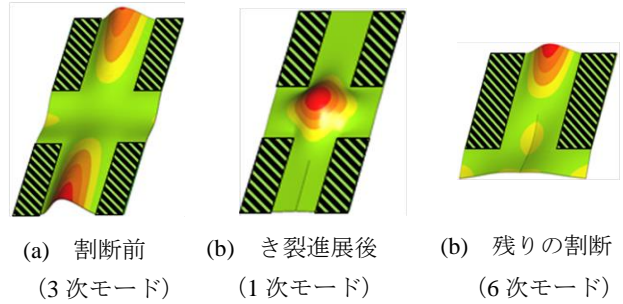


図 8 各モードの振幅形状

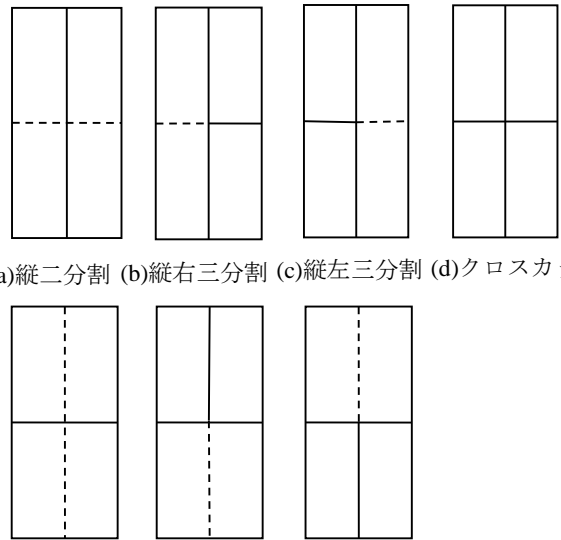


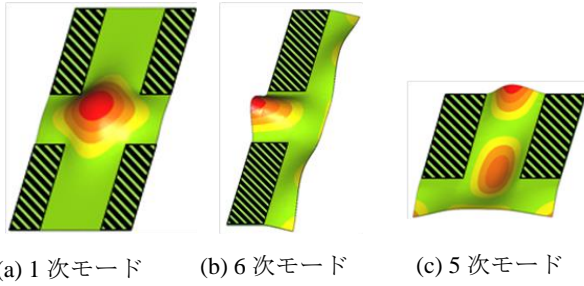
図 9 ガラスの割断状況

られる。つまり、ガラス形状寸法が異なると、固有振動数が変化し共振点からずれてしまうため、ガラスの振幅変位が小さくなり、そのため、2 分割後のガラス割断の成功率が低くなっている。

3.4 合成波による割断実験と実験結果

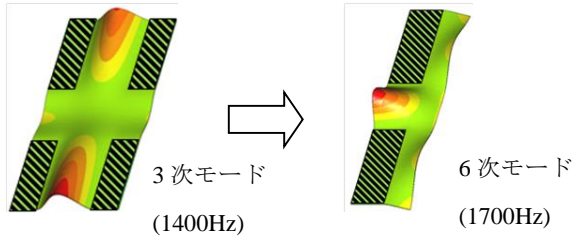
前述のように、3 工程による割断法の実験は、不安定な結果となった。そのため、割断工程を分けず、一度に割断する方法を検討する。そのため、それぞれの割断に適した次数の振動モードの共振周波数の波を合成した音波で加振し、割断する実験を行った。今年度は、長方形のガラスであるため、二分割後のガラスが 2 種類発生する。そのため、用意する周波数は 3 種類とした。図 10 に割断前と二分割後のガラスの割断に適した振動モード形状を示す。

予備実験の結果より、割断前のガラスの 1 次モードの固有振動数 f_1 (800Hz) と、二分割後 (27.5mm × 110mm) のガラスの 6 次モードの固有振動数 f_2 (1700Hz) と、もう一方の 2 分割後 (55mm × 55mm) のガラスの 5 次モードの固有振動数 f_3 (1800Hz) を合成した波形を用いて割断実験を行うこととする。

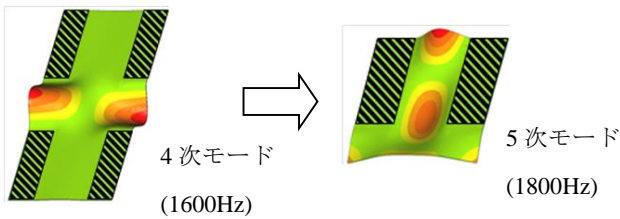


(a) 1次モード (b) 6次モード (c) 5次モード

図10 合成波に適した振動モード



(a) 先に縦方向を割断する振動モード



(b) 先に横方向を割断する振動モード

図11 実験で使用する振動モード形状

実験に使用する合成波は、以下のとおりである。

$$y = A\sin(2\pi f_1 t) + B\sin(2\pi f_2 t) + C\sin(2\pi f_3 t) \quad (1)$$

ここで A , B , C は振幅, t は時間である。これをファンクションジェネレータに入力し、振幅 5V、アンプの増幅率 17.7dB で割断実験を行ったが、ガラスは割断できなかった。この理由として、ファンクションジェネレータの出力部の上限值を超えないよう合成波の振幅を設定したため、これまでの実験よりも 3 つの周波数成分の振幅がそれぞれ 1/3 程度に小さくなったためと考えられる。

3.5 2工程による割断実験と実験結果

合成波による割断実験でガラスを割ることが出来なかったため、2工程に分けて加振する方法を検討する。この理由は、合成波による割断実験では、アンプの性能により加振力が低くなり、割断する事ができなかったが、それぞれ単一周波数で加振することで加振力を向上させ、ガラスを割断することができると考えたからである。

しかし、割断前の1次の振動モードで加振すると、横方向と縦方向のどちらが先に割断するかわからないため、横方向と縦方向の一方を先に割断すること

表3 2工程による割断実験結果

実験番号	固有振動数		割断状況		
	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	二分割	三分割	クロスカット
1	1600	1800	-	横上×	-
2	1600	1800	-	-	×
3	1400	1700	-	-	-

表4 固有振動数

実験番号	固有振動数		
	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]
1	810	1420	
2	820	1590	
3	820	1660	
4	790		
5	800	1440	1800
6	800	1380	1430

とした。図11に実験で用いた振動モードを示す。図11(a)に示す振動モードが、先に縦方向を割断し、その後横方向に割断するための振動モード形状である。図11(b)に示す振動モードが、先に横方向を割断し、その後縦方向を割断するための振動モード形状である。

表3に2工程による割断実験の結果を示す。表3における×は、スクライブ線から逸れて割断が失敗したことを表しており、割断状況は図9と同様である。ガラスがスクライブ線から逸れているのは、振動モードからわかるように、ガラス中心部が振動していないことに起因しており、二分割には割断できるが、中心付近でスクライブ線から逸れてしまったと考えられる。また、図11(a)に示す縦方向を先に割断する振動モードは、き裂が深く進展しているように見えたが、割断はできなかった。

3.6 共振周波数と加振時間を考慮した割断実験と実験結果

3.6.1 固有振動数の測定

ガラスの固有振動数は、それぞれ異なる値をもつため、合成波による割断実験や2工程による割断実験では、固有振動数付近で加振を行ったにもかかわらず、ガラスは割断に至らなかった。この原因は、僅かに共振周波数がずれていたため、ガラスが共振せず、振幅が小さかったためと考えた。従って、この実験では、ガラスを割断する前に、あらかじめ固有振動数を正確に測定することにした。さらに、短時間で素早く割断することが目的であるため、割断する際の加振周波数をトリガ制御し、100波と200波による加振での割断実験を行った。表4に、ガラスの固有振動数を測定した結果を示す。

表5, 6に100波と200波による割断実験結果を示す。表5, 6に示す値は、表4に示す固有振動数で100波あるいは200波を1セットとして、加振した

表5 100波による加振

実験 番号	固有振動数			割断状況		
	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]	二分 割	三分 割	クロス カット
1	1	2		-	-	○
2	3	3		縦○	-	-
3	2	2		-	縦右 ○	-

表6 200波による加振

実験 番号	固有振動数			割断状況		
	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]	二分 割	三分 割	クロス カット
4	1	2		縦○	-	-
5	1	10	10	横○	-	-
6	5	10	5	縦○	-	-

回数を示している。表5, 6より、クロスカットが成功しているのは1枚のみであった。それ以外は二分割や三分割であった。これは、100波あるいは200波で最初に加振した際に割断できなければ、それ以降の加振では、ガラスの固有振動数が変化しているため、き裂がそれ以上進展しなかったためと考えられる。

4. 割断加工法としての評価と考察

これまでの実験結果から、加振時間を考慮した割断実験は、長方形サイズのガラスを割断する際、割断する工程を分けない方が有効である可能性が高い。

合成波による割断実験では、アンプの出力制限により、合成波の振幅が小さく割断には至らなかった。

2工程による割断では、両端部が振動しているモードであったため、中心部が振動しておらず、スクライブ線から逸れやすい結果となった。そのため、中心部が大きく振動している振動モードが割断には適している。

加振時間を考慮した実験では、正確な固有振動数を測定し、割断を行ったが不安定な結果となった。これは最初に加振する100波あるいは200波で割断できなかったため、き裂がそれ以上進展しなかったためであった。

従って、ガラスが割断に至らなかった原因は、アンプの出力不足であった。また、正方形で行った昨年度の実験と今年度の実験条件でFEM解析を行い、亀裂を開口させる引張応力の最大値を比較した所、固定条件やガラスサイズの影響で、約25%程度引張応力が低下していた。そのため本来は、正方形の場合より、加振力を増強させる必要があった。現在のアンプの入力限界が(両振幅で)5Vであり、増幅率は充分であったが、出力限界が(両振幅で)36Vで

あった。そのため、出力限界が45V以上のアンプの導入が必要である。この問題点を改善することで、ガラスを非接触クロスカットできると考えられる。

5. 結言と今後の方針

振動モードを利用したFPD用ガラスの非接触割断加工の可能性について検証するために、割断実験やFEM解析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 割断前の1次モードの固有振動数と二分割後の5次モードと6次モードの固有振動数の三種類の固有振動数を重ね合わせた合成波を使用した。割断には至らなかった。しかし、1点加振で、一度にクロスカットできる可能性を示すことができた。
- (2) 合成波を用いて割断する場合には、その周波数成分が増えるほど、ファンクションジェネレータやアンプの入力限界を超えないように設定する必要があり、さらなる増幅率の改善が必要である。

以上のように、本研究におけるガラスの割断加工に必要な問題点が示された。今後は、アンプの性能の評価や加振力の向上、加振方法を工夫するなどの検討が必要である。

参考文献

- (1) 吉川昌範, 鈴木数夫, 大竹尚登, 太田稔, 向井良平, ダイヤモンド技術総覧, 明誠企画株式会社, (2007).
- (2) 永田紀一郎, 林田興志郎, 佐世保高専卒業論文, (2012).
- (3) 清水政二, ガラスのレーザ分断技術, New Glass Vol.23-2, (2008).
- (4) Possibility of Non-Contact Cutting Technology of Glass Using Vibration Modes, H.Morita, T.Sonoda, K.Hayashida, K.Nagata, Y.Hara, Dynamics and Design Conference 2012, (2012).
- (5) 山本幸司, 羽坂登, 森田英毅, 大村悦二, ガラスのレーザスクライブにおける熱応力解析, 精密工学会誌 Vol.71, No9(2005).