音圧レベルを用いた板紙型抜き加工センシング*

貞本 晃** 山口貴史*** 永澤 茂† 福澤 康† 山口大志郎†† 片山 勇††

Sensing for Machining Using Pressure Level of Sound Radiated by Paperboard Die Cutting

Akira SADAMOTO, Takashi YAMAGUCHI, Shigeru NAGASAWA,
Yasushi FUKUZAWA, Daishiro YAMAGUCHI and Isamu KATAYAMA

This paper describes the possibility of sensing for machining, using the sound that occurs under paperboard die cutting, which is commonly used for making various paper packages. Among the actual production lines, it is important to estimate the wear of die tools. And any kind of automatic technique for detecting cutting condition is required for increasing productivity and reducing operator's task. In this study, the sound radiated in the cutting process was measured by varying several machining conditions on the test machine, and analyzed. The following results were obtained: The sound seems to be caused by impulsive strike between a blade tip and a counter plate; The repeatability of sound waveform is very good in the same machining condition; Obvious feature is not revealed in the sound spectrum for distinguishing each condition; On the other hand, a sound pressure level (SPL) denotes obvious difference among each condition; The radiated sound energy is almost in proportion to the elastic energy stored in the machine just before completion of cutting. Hence, the SPL would become a good index to denote the wear of blade tip, the occurrence of harmful thread dross, etc.

Key words: sensing for machining, die cutting, paperboard, sound analysis, sound pressure level

1. 緒 言

板紙の型抜きは、面板上に置かれた紙を切刃で押し抜く加工法であり、包装箱製造など多くの生産現場で用いられている。専用の型抜き機によって、継続的に給紙した板紙を単一の抜型で繰返し切断するのが一般的であり、高速化による生産性向上が図られている。しかし、製品の品質維持・管理のためには、切断状態及び切刃の監視が重要であり¹⁾、連続運転中の装置を一時停止して検査を行うことが生産工程上のロスとなっている。そこで、運転を止めずに加工状態を簡易に検知する方法の確立が望まれている。

永澤らは、実際の型抜き機を模した試験機を用いて、板紙型抜き加工における切断特性を研究してきた^{2)~4)}。これらの研究において、板紙切断時にかなり大きな音が発生することが認識された。音響情報を加工監視に用いる試みは種々行われているが^{5), 6)}、板紙型抜きにおいても、音による加工診断が可能ではないかと考えた。

本研究では、切断に伴って生じる音を用いた加工監視の実現可能性を探るために、板紙型抜き試験機を用いて、切断条件を任意に変化させながら発生音を録音・解析し、その特徴や再現性について調べる。また、切断条件と発生音との関係を明らかにすることにより、加工センシングへの適用可能性を探る。

2. 実験装置および実験条件

実験装置の概略は図1のとおりである。試験機において、楔形の切刃を偏心量 $e=25\text{ mm}$ のクランク機構により 5 rpm で上下往復運動させ、下方の面板上に置いた板紙を押し抜く。面板と切刃との相対位置は、面板高さを微調整することにより、切刃の下死点において、切刃と面板の間に一定の線荷重 $f_{i,\max}$ が生じるように設定する。試験機には紙送り機構が併設されており、図1(b)の横方向に紙を断続的に約 2 mm 間隔で搬送しながら、1つの刃に対して数回の切断を行った。

切刃は、長さ 80 mm × 高さ 23.6 mm × 幅 0.7 mm、刃先角度 $\alpha=42^\circ$ 、刃先硬度 約 600 Hv、素材硬度 約 330 Hv の直線

(a) Whole view

(b) View from A in (a)

(c) Mended blade tip

Fig.1 Apparatus for measurement

* 原稿受付 平成 14 年 4 月 1 日

** 正会員 筑波技術短期大学 (つくば市天久保 4-3-15)

*** 長岡技術科学大学大学院 (長岡市上富岡町 1603-1)

† 正会員 長岡技術科学大学工学部

†† (株) 片山型製作所 (東京都新宿区東五軒町 3-7)

Table.1 Nominal basis weight ρ and thickness t_p of paper

ρ g/m ²	270	310	350	400	450	550
t_p μ m	331	387	447	508	570	690

Table.2 Condition of the main experiment

$f_{i,max}$ kN/m	40	
w μ m	brand new	8
	mended	31, 37, 41, 49, 52, 56, 62, 67, 72, 74, 82, 100, 154
ρ g/m ²	350 (nominal)	
φ °	90	
paper storage	laboratory	constant humidity box
corresponding figure in Ch.3	2, 4, 5, 8, 9, 10	8, 9, 10

状の1枚刃である。新品状態のもの、刃潰れを模して刃先を台形状に研磨し、図1(c)のとおりの刃先幅を w としたものを用いた。面板は、材質 SUS630、板厚 1.5mm、表面硬度約 500Hv の平板である。被加工材は、坪量 ρ g/m² の白紙紙⁷⁾である。坪量は公称値であるが、実測した範囲では実際の面密度によく一致していた。また、板紙の体積密度はほぼ一定であり、同一坪量での板厚のばらつきは最大で $\pm 1\%$ 以下であった。本論文で利用した板紙の公称坪量に対する板厚実測値を表1に示す。さらに、紙の抄造方向と切刃とがなす角度を φ とする。

図1の試験機を用いた主実験での測定条件を表2にまとめる。 w は、刃の長さ方向10個所での実測値の平均値である。また、室温 22°C、湿度 45% の実験室内で保管した紙と、湿度 60% の保湿機で保管した紙を用いた。表中には、3章における図との対応を示すために、図番号を記した。表2に該当しない測定については、後で個別に条件を示す。

切刃および面板は、それぞれ幅 340mm × 奥行 310mm × 高さ 20mm の鋼製の板に取り付けられており、下側の板の上面と同一高さで板端部から 500mm 離れた位置に 1/4 インチマイクロホンの中心が来るように、標準騒音計（小野測器 LA-500、20Hz～12.5kHz）を図1(a)のとおりに設置した。ここで受信した音を DAT レコーダで録音後、パソコンで波形解析・FFT 解析を行った。使用したソフトウェアは Sound Technology 社 Spectra PRO である。録音・解析における音響データの処理はすべて 44.1kHz 精度で行った。

3. 実験結果

3.1 切断抵抗の変化

まず参考のために、図1の試験機で、音の測定と同時に行った荷重測定の結果の一例を図2に示す。縦軸の f は、図1(a)のロードセルで測定される荷重値を切刃長さで割った線荷重である。横軸の x は、下死点を $\theta=0$ とするクランク回転角度 θ に対して、

$$x = \text{sgn}(\theta) \varepsilon (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

で計算したものである。 sgn は指数の符号を表し、切刃の下降・上昇をそれぞれ負・正で表すために用いた。 x は、刃先が紙や面板に当たることなく自由にクランク運動している状態での切刃の変位を、下死点を 0 として便宜的に表す量である。

図中の Idle cutting は、紙がない状態で切刃を上下運動させて面板に押し付けた場合を示しており、これを空打ちと称する。荷重が生じている⑤～⑥の範囲では、刃先は面板に接して

Fig.2 Line force vs. blade stroke: $\rho=350$ g/m², $\varphi=90$ °

Fig.3 Press test stand

おり、刃は面板に対して進行することができない。試験機的面板から下の部分は十分に剛性が高いので、⑤～⑥での x の変化量は、試験機のクランク軸受から刃先までの弾性変形量に相当するものと考えられる。この範囲で f と x の関係は直線的であり、下死点に関して対称であるので、試験機上部は、刃先に加わる上向き荷重に対する単純な線形ばねと見なせる。

面板の上に紙がある状態では、空打ちの場合に比べて紙の板厚分だけ高い位置で刃先が紙表面に接触する。表1より $\rho=350$ での板厚は 0.447mm であるが、図2の①と⑤の差は約 0.35mm であり、板厚より約 0.1mm 小さい。すなわち、①に至る前の約 0.1mm の範囲では、ほとんど荷重が生じないままに紙が初期的に押し縮められている²⁾。①を過ぎると、 f は単調増加しはじめ、以後、刃先幅 w に依存して概ね3とりの変化パターンを示す。

w が小さい場合、 f は初期単調増加の後に、図2③から緩やかな増加傾向を示し、④の極大点に達した後急激に低下し、ここで紙が最終破断する。それと同時に刃先が面板に接し、以後 f は空打ちの場合と同じ変化をする。 w が中間的な値の場合、 f は初期単調増加から極大点①に至った後にいったん減少し、②において最終破断に至る。いずれの場合も、 f の初期単調増加が終わった④ないし⑤で紙の表面層が破れ、④ないし⑤に至る範囲で刃先が紙内部に進行することが観察されている⁴⁾。 w が大きい場合は、初期単調増加のまま極大点④に達し、ここで一気に最終破断する。

3.2 音の発生原因

本節では、図2の過程における音の発生時点を明確化するためにに行った予備実験について示す。図1の試験機は、実際の型抜き機と同様のサイクルにおいて連続的にデータを採取するために構成したものであり、工程中の任意の位置で高精度に運転を停止させることはできない。そこで、図3に概略を示す圧縮試験機（アイコーエンジニアリング MODEL-1311DWS）を用いて別に実験を行った。

圧縮試験機上部に切刃を固定し、上方への変位・速度が調整可能な下部台座に面板を取り付け、その上に板紙を置いた。

Fig.4 Wave form of the sound:
 $\rho=350\text{ g/m}^2$, $\varphi=90^\circ$, $w=31\text{ }\mu\text{m}$, $f_{i,\text{max}}=40\text{ kN/m}$

紙が刃先から十分に離れる位置から始めて、台座を微速上昇させていくと、ある時点で切刃と紙との間に接触荷重が生じる。任意の微小な接触荷重が検知された時点で台座が基準高さに到達したと判断し、ここからさらに任意の設定距離だけ台座を微速上昇させた後に直ちに下降させる。この上昇距離設定値を少しずつ変化させながら、荷重と音の測定を繰り返し行った。表2に示した条件の実験室保管の紙を用い、紙の面内で切刃を押し付ける位置が毎回の測定で重ならないように、台座を下降させるたびに紙の位置を数mmずつずらした。なお、マイクロホン位置等の音の測定系は、図1と同じにした。

表2に示した刃先幅のうち、 $w=31$ 及び $82\text{ }\mu\text{m}$ の2種類の刃について調べた。これらの刃先幅の場合、3.1節の最後の段落で述べたとおり、刃先荷重が大きくなると、紙の表面層が破れ、刃先が紙内部に進行する。図3の装置において台座上昇距離設定値を微調整し、表面層破壊と最終破断の間、すなわち図2の⑥と⑦もしくは⑧と⑨の途中に該当する位置まで刃先を進行させた場合、暗騒音に対して検知可能な音はいっさい生じなかった。図2⑧のように、⑧の最終破断よりも高い荷重による表面層破壊が起きる場合であっても音が生じないことから、紙が破れることによる音は十分に小さいものと推察される。これに対し、上昇距離設定値をわずかに増して最終破断に至らせた場合には明確な音が生じた。したがって、型抜き時に発生する音は、紙が最終破断して切刃が面板に衝突するとき生じる衝撃音と考えるのが妥当であろう。

3.3 発生音の波形及びスペクトル

図1の試験機における受信音波形の一例を図4(a)に示す。波形は、ある時刻で立ち上がった後に、振動減衰する形を呈する。表2の条件に加えて $f_{i,\text{max}}$ 、 ρ 、 φ を変化させた場合の測定もいくつか行ったが、いずれも立ち上りの約100msでほぼ減衰が完了する形の、図4(a)と同様の減衰波形が得られた。

同一条件のもとで紙を搬送しながら連続数回の測定を行った結果の一例として、図4(a)の条件で連続5回測定した波形を、立ち上り時刻をそろえて重ねて図4(b)に示す。横軸の時間範囲は、図を見やすくするために、立ち上りから10msに限った。図から明らかなように、5個の波形は互いに区別できない

Fig.5 Spectrum of sound obtained by the test machine in Fig.1

Fig.6 Spectrum of sound obtained by the press stand in Fig.3

程度によく一致しており、受信音の時系列での再現性は極めてよいといえる。図中に表示していない10ms以降についても同様の再現性であり、切断条件を変えた波形においても同様の再現性が得られた。実際の型抜き機では、同じ種類・寸法の紙を同じ抜き型で数万～数十万回程度連続的に抜いていくが、切断が同じ状態で繰り返されるならば、ある程度のばらつきの範囲内で同じ受信音を得られるはずである。言い換えると、運転時の発生音を継続的に監視すれば、その変化によってある程度の確率範囲で加工状態の変化が検知できると期待される。

つぎに、受信音スペクトルについて示す。単発の振動減衰波形であるが、ここでは通常のFFT演算を行った。図4(a)より、受信音の振幅が大きいのは、立ち上り時刻から約30msまでの範囲である。したがってこの部分を重視し、ここでの周波数成分が明確に現れるように、立ち上り時刻の40ms前から時間幅92.9msを切り出し、Hanning窓をかけてFFT演算した。立ち上り時刻前での受信音レベルは十分に小さく、暗騒音のスペクトルへの影響は小さい。時間幅は、 $44.1\text{ kHz} \times 92.9\text{ ms} = 4096 = 2^{12}$ のデータ点数に相当する。周波数解像度は $44100/4096 \approx 10.8\text{ Hz}$ 、周波数範囲はサンプリング定理より $44.1/2 = 22.05\text{ kHz}$ 以下となる。

結果の一例を図5に示す。音圧レベルは、 $2 \times 10^{-5}\text{ Pa}$ を基準とする、周波数解像度に応じた計算帯域ごとのバンドレベルである。図5(a)より、周波数成分は広帯域に分布しており、

Fig.7 Sound pressure level vs. basis weight

周波数が高くなるとともに低下するいわゆるピンクノイズ状のスペクトル分布であることが分かる。すなわち、切刃と面板の衝突による衝撃加振で生じた広帯域成分が、基本的にはそのまま受信されていると判断できる。ただし、図中の低周波数範囲にピーク成分が見受けられるので、これを確認するために周波数範囲を狭めたものを図5(b)に示す。

図5(b)より、顕著なピークは約700Hzに現れており、100～300Hzでの成分も比較的大きいことが分かる。同図には、刃先幅 w が異なるいくつかの場合を重ねて示しているが、 w に依存してレベルが全体的に変化するものの、いずれもスペクトル分布は同様である。図1の試験機で、表2の条件に加えて $f_{i,max}$ 、 ρ 、 φ を変化させた場合、さらには面板の厚さを変えた場合の測定も行ったが、図5(b)と異なる分布形状を持つスペクトルは得られなかった。

参考のために、図3の圧縮試験機で切断したときの受信音スペクトルを図6に示す。音の加振部分を構成する切刃・紙・面板は図1と図3とで同じものであるが、図5と図6とでは明らかに異なるスペクトル分布になっている。このことから、切断による広帯域加振成分のうち、加振部分の周囲環境、特に機械の寸法・質量・剛性等に依存する成分が実際には大きく受信されると判断してよいであろう。したがって、スペクトル分布から切断状態に特有な情報を見いだすことは難しいと言わざるを得ない。実際の型抜き機においても、機種及び受信位置に特有な受信音スペクトルが得られると類推される。

一方、音の大きさは、図5(b)から分かるとおり、切断条件に依存して変化することが明白であるので、以下、これを対象として検討を進める。

3.4 切断条件と発生音レベルとの関係

音の波形から得られる音の大きさとして、時間平均音圧レベルを算出する。図4に一例を示したとおり、波形の立上り時刻から $T=30\text{ms}$ の時間幅が主たる変動範囲なので、ここの音圧実効値 P を算出し、 $P_0=2 \times 10^{-5}\text{Pa}$ を基準とするdB値 L_p に換算した。式で表すと、以下のとおりである。ただし、 p は音圧、 t は時間である。

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt} \quad (2)$$

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad \text{dB} \quad (3)$$

まず、表1に示した各坪量 ρ を持つ紙を、 $\varphi=0^\circ$ 及び 90° で切断したときの音圧レベルを図7に示す。実験室内で保管した紙を用いて、図1の試験機で $f_{i,max}$ と w を固定して得たも

Fig.8 Sound pressure level vs. tip thickness

のである。

図より、坪量が大きくなると音圧レベルが大きくなることが分かる。これは紙が厚いほど切断に要するエネルギーが大きくなる²⁾からであるが、実際の型抜き機では運転途中に紙の板厚を変えることはないので、診断上は事前に当該板厚の紙において得られる音圧レベルが分かればよいことになる。

また、紙の抄造方向に直角に切る $\varphi=90^\circ$ の場合のほうが、 $\varphi=0^\circ$ の場合よりも5dB程度大きな音を得られることが分かる。実際の型抜きでは直方体状の箱を展開した形に紙を抜くことが多いので、切断角は概ね $\varphi=0$ もしくは 90° となる。これらが同時に切断される場合、両方の音が同時に生じることになるが、測定される音圧レベルは両者のパワー和になるので、実質的には $\varphi=90^\circ$ でのレベルにほぼ等しくなる。 $\varphi=90^\circ$ での切断のほうが切断抵抗が大きく²⁾、それだけ刃の劣化が速いとともに切断不良も生じやすいので、 $\varphi=90^\circ$ での発生音が支配的に観測されることは診断上は好都合であろう。

つぎに、図1の試験機において、表2の条件に従って刃先幅 w を変化させた場合の結果を図8に示す。各 w において5回連続切断して得た音圧レベル L_p のパワー平均値を点で表し、それらを直線で結ぶとともに、その上下に、各切断で得られた5個の音圧レベル中の最大値及び最小値を示した。

図より、音圧レベルは w に対してほぼ単調に増加している。また、 $w=72$ 及び $154\mu\text{m}$ の場合にややばらつきが大きいものの、各条件での5個の音圧レベルは多くの場合で1dB程度の差の範囲内に入っており、音圧レベルは精度のよい診断指標になると期待できる。ただし、紙の保管状態による差異は図8では見出せなかった。

実際の型抜き機では、1つの抜型に対して切断不良が生じ始めるまで、同じ材質・寸法の紙を連続して抜いていく。したがって、型抜きが正常に繰り返され、徐々に刃潰れが進行していく場合、発生音は図8に沿う形で徐々に大きくなるはずである。現場で用いる機械・紙に対して、図8と同様の基準レベルを設定しておけば、運転時の音響モニタリングによって、刃潰れ進行状況を知り得る可能性がある。

また、紙の型抜き工程において刃先が潰れてくると、紙の切断部に糸状の紙粉が発生し、製品品質の低下につながる⁴⁾。参考のために、図8のデータを得たときの切断によって生じた糸状紙粉の発生率を図9に示す。発生率とは、紙粉を各切

Fig.9 Occurrence of thread dross

断ごとに全数採取してそれぞれの長さを測り、その合計値を刃の全長で割った値である⁴⁾。図から分かる通り、紙粉は $w=40\mu\text{m}$ 程度で発生し始め、 $w=80\mu\text{m}$ 程度で刃の全長に渡って生じるようになる。このように、紙粉発生は刃先幅に依存しているので、音響モニタリングは紙粉発生予測にも役立つといえる。

さいごに、図8の音圧レベルと図2の切断抵抗との関係について考察する。図2に例示した線荷重 f において、音の大きさに関係するのは、音が発生する直前、すなわち図2の④、⑤、⑥に相当する破断直前線荷重と考えられる。そこで、これを f_c で表し、式(3)の音圧レベルとの比較のために、

$$L_E = 10 \log_{10} \frac{f_c^2}{f_0^2} = 20 \log_{10} \frac{f_c}{f_0} \quad \text{dB} \quad (4)$$

として基準化する。基準線荷重 f_0 は任意であるが、ここでは、表2の $f_{i,max}$ の設定値に合わせて $f_0=40\text{ kN/m}$ とする。

図8の各測定で得た音圧レベル L_p に対して、音の測定と同時に得た線荷重曲線から破断直前線荷重 f_c を求めて式(4)の L_E を計算した。各条件で5回ずつ測定しているため、図8での全測定回数は140回であるが、これらすべてについて L_p と L_E の関係をまとめたものを図10に示す。新品の刃で得たデータを▲、刃先研磨した刃でのデータを●で示した。▲は図の左下に集中しており、これらを除いた●のデータにはほぼよい直線関係が見出せるので、直線回帰を行ってみた。その結果、図中に示したとおり、傾きがほぼ1となった。

3.1節の第2段落で示したとおり、試験機上部は上向きの荷重に対して単純な線形ばねとしてはたらく、一定のばね定数 k を持つと考えてよい⁴⁾。切刃長さを l とすると、線荷重 f での荷重は fl であるが、これを受けて上向きに長さ y だけ変形したときに試験機が蓄える弾性エネルギーは、

$$E = \frac{1}{2}ky^2 = \frac{1}{2}k\left(\frac{fl}{k}\right)^2 = \frac{l^2}{2k}f^2 \quad (5)$$

であり、 k と l が一定値なので E は f^2 に比例する。すなわち、式(4)の L_E は破断直前の弾性エネルギーを基準化した値に他ならない。一方、これと同様に、式(3)の L_p は、 P^2 に比例する音響エネルギーを基準化した値と見なせる。図10の回帰直線の傾きがほぼ1ということは、 f_c^2 と P^2 の間により比例関係があることを意味する。紙の破断直前に機械的に蓄えられたエネルギーの一部が一定の割合で音のエネルギーとして放出されると見なしてよいであろう。

なお、▲で示した音圧レベルは、上記の回帰直線からかなり外れている。ここでの刃先幅は $w=8\mu\text{m}$ と特に鋭利であり、刃先を研磨した刃に比べて相対的に刃先がかなり変形しやすいと考えられる。そのため、エネルギーの一部が刃先変形によって

Fig.10 Sound pressure level vs. stored elastic energy

吸収され、発生音が余分に小さくなったと考えられる。

4. 結 論

板紙型抜きに伴って生じる音に着目し、これを加工診断に活用するための基礎データを得た。一定の切断条件において生じる音の波形には、基本的により再現性があることが分かった。発生音は、振動減衰する単発衝撃音の様態を呈するが、加工機自体に依存する周波数成分が大きく受信されるため、スペクトル情報の加工診断への活用は難しい。しかし、その音圧レベルは切断条件に従って変化し、各条件との間により相関があることが分かった。刃先が特に鋭利な場合を除けば、発生する音のエネルギーは、紙の破断直前に蓄えられた弾性エネルギーに比例すると見なせ、音圧レベルと切断抵抗とに有意な関係が存在する。実機においても、予め発生音の基準レベルを定めておけば、音の継続監視によって刃潰れ検知や紙粉発生予測ができる可能性がある。

謝 辞

王子製紙株式会社の竹田昌史氏から、白板紙のご提供にご尽力いただいた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- Hofer, H and Wurth, V: Stanzkraft und Messerverschleiss beim Stanzen von Wellpappe - teil2, Papier+Kunststoff Verarbeiter, 10 (1994) 33.
- 永澤茂, 福澤康, 日根哲, 片山勇, 吉澤昭宣, 古見丈夫: 板紙の型抜きせん断特性に及ぼす刃先隙間と板厚の影響, 塑性と加工, 41, 469 (2000) 126.
- 永澤茂, 佐藤仁, 山口大志郎, 福澤康, 片山勇, 吉澤昭宣: 板紙の型抜き切断抵抗と刃先形状に及ぼす刃先隙間と刃材硬さの影響, 塑性と加工, 42, 480 (2001) 38.
- 永澤茂, 福澤康, 山口貴史, 村山光博, 山口大志郎, 片山勇: 板紙の型抜きにおける糸状紙粉の発生に及ぼす刃先形状の影響, 塑性と加工, 43, 498 (2002) 50.
- 長田佐, 大内英俊, 河西敏雄: 可聴音によるラッピングの監視, 精密工学会誌, 66, 4 (2000) 640.
- 佐久間邦郎, 岡島健一, 上田隆司: ホーニング音の研究, 精密工学会誌, 67, 5 (2001) 814.
- 大江礼三郎ほか: パルプおよび紙, 文永堂出版, (1991) 186.