可聴音によるラッピングの監視*

長田 佐** 大内 英俊** 河西 敏雄***

Monitoring of Lapping Process by Audible Sound

Tasuku OSADA, Hidetoshi OHUCHI and Toshio KASAI

In this paper, using audible sound caused by the vibration of the work and weight, monitoring methods during the lapping process are discussed. And with a microphone, a non-contact process monitoring method is established. The authors had already confirmed that it is possible to predict the roughness of the processed surface by detecting the vibration acceleration signals of the revolving work. Considering that experienced workers can judge processing conditions by their sense of hearing, it is possible to monitor the process by audible sound. But the necessary useful signals cannot be obtained by just putting a microphone close to the work. So for the purpose of picking up the signal easily, two methods are proposed. They are (1) making the weight into exponential horn shape to amplify the vibration, and (2) drilling holes in the weight and making use of the resonance of the air in the holes. According to the results of the experiment, it is confirmed that if the resonance frequencies of the horn and the air column in the holes are appropriately selected, process surface condition can be monitored by either methods mentioned above.

Key words: lapping, monitoring, audible sound, surface roughness, exponential horn, air column

1. 緒 言

ラッピングでは、砥粒の破碎や転動があり、広い周波数範囲の音響、振動が発生することは十分に予測されることである。筆者らは、ラッピングで発生する振動周波数の全帯域に注目するのではなく、比較的低周波域の特定の周波数の振動を圧電セラミックセンサで検出し、この振動のピークレベル値の変動から加工状況を監視することを提案し、加工中の表面粗さが予測可能であることを確認してきた¹⁾。

一方、研削砥石からの研削音が砥石の研削性能に関する情報を含むことに着目し、砥石の状態を推測し加工プロセスや加工物の異常の有無を予測する方法も提案されている^{2) 3)}。また、切削加工では、びびり振動の発生を加工音から検知する方法が報告されている⁴⁾。

ラッピング中に発生する音は研削や切削に伴う加工音に比べれば低レベルであるが、加工状態の情報も含んでおり、空气中に放射されると考えられる。熟練作業者が聴覚によって加工の実態を把握していることを考えれば、可聴音によるラッピングの加工監視も可能はずである。マイクロホンを使用すれば、回転する加工物に加速度計を取り付ける方法よりは測定装置が簡単になり実用性も増す。

本研究では、修正輪形研磨装置を用いて、遊離砥粒による研磨加工中の加工物の振動に起因する可聴音をマイクロホン（エレクトレットコンデンサマイクロホン）を用いて検出し、ラッピング状態の監視の可能性を検討した。

2. 監視に利用する周波数

2.1 実験条件

実験に用いた修正輪形研磨装置は、ラップ外径300mm、内径70mmの铸铁製ドーナツ板であり、その回転数は、0から100rpmまで連続可変である。修正リングの外径は約140mm、内径は110mmである。加工物は、直径100mm、厚さ10mmのアルミニウム合金でリング内径に収まる。ラップ圧力は、4.0kPaとし、ラップ周速は12, 24m/min、ラップ剤としてSiC#600（平均粒径20.6 μ m）、#800（14.7 μ m）、#1000（11.4 μ m）、#1500（8.3 μ m）の砥粒を用い、水と砥粒の混合濃度を重量比で約15%にした。

なお、本章では、加工に伴う発生音のうち監視に利用する周波数を特定するため、すでに監視法の確立している加工物の加速度振動を検出する方法¹⁾を用いることにする。

2.2 ラップの共振周波数

本報における実験の砥粒径や加工物の大きさでは、ラッピングによる発生振動の主な周波数が1~3kHzとなることを、筆者らは、固有振動数の十分高いラップを用いた実験、および簡単な振動モデルとHertzの接触理論による解析によってすでに明らかにしている⁵⁾。

今回、上述のラップを用いて実験したところ、発生振動のレベルのピークは、図1に示すように1.3kHzと2.7kHz付近に現れた。平均砥粒径や、ラップ速度を変えても、2つの周波数は変化しなかった。

そこで、铸铁製ドーナツ状ラップの加工面の中央付近（ラップの中心から92.5mm）に圧電式加速度ピックアップを接着して、ラップ周辺の任意位置を軽くハンマで加振した。その結果、ラップ自身が板状であるので複雑な振動モードの発生が考えられたが、定常波として図2に示すような1.3kHzと2.7kHz付近

* 原稿受付 平成11年8月30日

** 正 会 員 山梨大学工学部（甲府市武田4-3-11）

*** 正 会 員 埼玉大学工学部（浦和市下大久保255）

Fig.1 Acceleration of work on the lap

Fig.2 Response of applying impulsive force on the lap measured by an acceleration sensor

に振動のピークが現れた。また、この周波数はラップ上の加工物の有無によってもほとんど変わらなかった。

加工に伴う発生周波数の範囲のなかにラップの共振周波数があることがわかったので、予備実験としてこれらの周波数の振動レベルによって加工の監視が可能かどうかを表面粗さを実測しつつ検証した。その結果、1.3kHzの振動レベルが利用できることが確認できたので、以下の実験ではこの周波数を監視に利用する。ラップが振動することは好ましいことではないが、監視用の周波数が固定される点では都合がよい。なお、ラップの固有振動数の影響がない場合には、1~3kHz付近にあるピークレベル値を利用することになる¹⁾。

3. マイクロホンによる振動検出

3.1 可聴音を検出するマイクロホン

圧電式加速度ピックアップでは、振動を非接触で検出できないので、回転する加工物を対象とする監視システムは複雑にならざるをえない。マイクロホンを利用すれば、振動を直接検出することはできないが、振動に起因する音が非接触で検出できるので、振動検出による加工監視がより簡単にできる。

可聴音の検出に使用したマイクロホンの特性は次の通りである。外観寸法は直径6.0mm×長さ5.0mm、電気的特性はインピーダンス2.2k Ω 、検出周波数帯域は20から20kHz、S/N比 58dB以上、無指向性、供給電圧2.0V、消費電流0.5mAである。このマイクロホンを外径8.5mm、長さ100mmのアルミニウム製パイプの先端内部に格納した。

3.2 おもりの振動検出

加工音の検出位置をラップ圧力を加えるおもり ($\phi 100 \times 70$) の上端面の中心位置付近で端面から約0.1mmとしたとき、S/N

Fig.3 Acoustic signal emitted from the work measured by a microphone

比が最も大きかった。ラップ剤をSiC砥粒#600、ラップ周速は12m/minの条件におけるおもり表面の発する音をFFTで20回測定して平均した結果を図3に示す。波形のパターンを観察すると、2.4kHzのレベルが突出している。これは加工物と同時に励振された修正リングの固有振動数に相当するもので、振動測定時には検出されなかった共鳴音であり、本測定においては外乱になる。1~1.5kHz付近の波形のパターンを見ても、加工に係る情報は確認できなかった。

また、ラッピング条件により、加工音は著しく増減する。とくに、細粒の砥粒で加工すると、加工音の発生は微弱となり、増幅器を用いて信号を増幅する必要があったが、S/N比が悪化する。大きな信号が得られる検出位置をラップ周辺で探すことなどを試みたが限界があった。加工音だけを選択して、マイクロホンにより検出するためにはさらに工夫が必要である。そこで次に、加工中に発生する振動の振幅を単純指数関数ホーンの共振特性を利用して増幅し、ホーンの発する音を検出する方法と、おもりに孔を明け、その管内気柱の共振特性を利用して音響レベルを増幅する方法を提案し、それぞれについて検討することにする。

4. 単純指数関数ホーンを用いた加工音の検出

4.1 単純指数関数ホーンと実験装置

加工の監視で注目すべき1.3kHzだけをホーンで増幅⁶⁾するのは、実験装置の構造上無理があった。修正リング内に収まる寸法から、固有振動数がおよそ21kHzの単純指数関数ホーンを製作した。ホーンの寸法は全長120mm、最小端面直径25mm、最大端面直径55mm、材質はステンレス鋼である。このホーンにおもりを載せラップ圧力を加えるため、振動モードへの影響の少ない節に相当する最大端面から53mmの位置にツバを加工し、図4に示す構造とした。

4.2 単純指数関数ホーンを用いた実験結果と考察

ホーンの最小端面の表面から約0.1mmの距離にマイクロホンを固定した。マイクロホンにはホーンの発する音のほか修正リングが発する音や周辺からのノイズも入っている。そこで、信号成分を抽出するため、中心周波数1.3kHzで選択度Qが約20のアクティブ素子構成のバンドパスフィルタを使用した。ラップ周速を12m/minとし、ラップ剤#600による加工中の測定20回を平均したFFT出力波形を図5に示す。ラップの共振点1.3kHzを中心に音響レベルが分布しているのが観察できる。

図6は、加工開始から5分経過後、加工物の表面粗さを触針式表面粗さ試験機で測定し、砥粒粒径と1.3kHzにおける音響レベ

Fig.4 Experimental apparatus for detecting the sound by an exponential horn

Fig.5 Acoustic signal emitted from the exponential horn measured by a microphone

ル値および表面粗さRaとの関係を示したものである。図に示すように平均砥粒径が小さくなるにしたがって、音響レベル値および表面粗さRaが減少する傾向が得られ、加工の監視が可能であることがわかった。

5. 気柱の振動による加工音の検出

5.1 気柱の振動を用いた検出法の検討

つぎに、気柱の共振特性を利用して加工音を増幅する方法について検討する。図7に気柱の振動を用いた実験装置を示す。ラップ圧力を加えるおもりの中心部に加工したφ20mmの貫通孔が管の役割をする。高い検出感度を得るために、気柱の基本振動数を1.3kHzに合わせ、管端補正も考慮して管の長さ、すなわちおもりの高さを約75mmとした。ところが気柱の振動の共振Qが鋭く、ピーク値付近の周波数分布が急峻すぎて、安定した値が得られなかった。砥粒粒径が細粒になるにしたがい音響レベル値も減少傾向を示すはずであるが、一度共振状態となると粒径による差異が現れなかった。共振のQが緩やかになるように、管内に吸音材を貼るなど工夫を試みたが、今回は良好な結果が得られなかった。

そこで、気柱の検出感度をわずかに低くする目的で、監視用周波数より低い1.0kHz付近が基本振動数となるよう、高さ80mmのおもりを用意し、この中心に直径20mmの貫通孔を加工した。

Fig.6 Relationship among diameter of abrasives, sound pressure level and surface roughness in lapping (in case of using the exponential horn)

Fig.7 Experimental apparatus for detecting the sound amplified by the resonance of the air column

気柱の振動の基本特性を求めるため、管から約30cm離れた水平方向に音源としてスピーカを置き、周波数を10Hzから5.0kHzの間で繰り返し掃引しながら正弦波を出力した。閉端から5mmずつ閉端に向けてマイクロホンの位置を移動させ、各位置で音響レベル検出し、基本振動1.04kHzと、3倍振動3.12kHzの音響レベル値を図8に示す。マイクロホンを閉端から約30mm離れた位置で、3.12kHzの3倍振動が大幅に低下し、1.04kHzの振動は増幅されている。

さらに管内の気柱の振動から得られる信号を調べるため、一例として管内の閉端から約50mm離れた位置にマイクロホンを固定したときの測定結果を図9に示す。大きな加工音を得る目的で、ラップ剤にSiC砥粒の#300を用いて、ラップ圧力4.0kPa、ラップ周速12m/minで実験した。図中に示すように、(a)は管長80mmの基本振動数約1.0kHz、(b)はラップの共振周波数約1.3kHz、(c)は修正リングの共振周波数2.4kHz、(d)はラップのもう一つの共振周波数約2.7kHz、(e)は管長80mmの3倍振動数約3.1kHzがそれぞれ観察できた。この出力波形のパターンから加工状態を判断することも可能であるが、本報では単一周

Fig.8 Sound pressure level of the air column

Fig.9 Detected acoustic signal of the air column
(Position of the microphone is 50mm from the bottom.)

波数の音響レベル値で加工の監視を行うことを考えている。

5.2 気柱の共振を利用した実験結果と考察

ラップ圧力4.0kPa, ラップ周速12m/min, SiC砥粒の#600のラップ剤でアルミニウム合金を加工したときの測定におけるFFTの出力波形を図10に示す。音の検出位置は、管内の閉端から約30mmである。1.0kHz付近をピークに音は分布しており、気柱の3倍振動が減衰したので、修正リングで発生する2.4kHzの音が除去できていることが確認できる。この検出信号の中には、加工の監視に利用できるラップの共振周波数1.3kHzの成分が含まれているはずなので、それを中心周波数1.3kHzのアクティブ素子のバンドパスフィルタ（選択度 $Q=20$ ）で選択した。図11にFFT出力波形を示す。気柱の基本振動である1kHzのほかに、1.3kHz付近の音響レベル値が大きく現れている。

この1.3kHzの音響レベルと加工面の表面粗さとの相関を調べるため、加工開始から5分経過後の加工物の表面粗さを触針式表面粗さ試験機で測定し、砥粒粒径と音響レベル値および表面粗さRaの関係が整理した。図12に示すように平均砥粒径が小さくなるにしたがって、音響レベル値および表面粗さRaが減少しており、本手法で抽出した信号は加工の監視に利用可能であることが確認できた。

Fig.10 Detected acoustic signal of the air column
(Position of the microphone is 30mm from the bottom.)

Fig.11 Detected acoustic signal after extracting the component of 1.3 kHz

Fig.12 Relationship among diameter of abrasive grains
sound pressure level and surface roughness
(in case of using the resonance of the air column)

最後に、同じ加工条件下で、単純指数関数ホーンの共振を利用して求めた図6と、管内の気柱の共振を利用して求めた図12を音響レベル値と表面粗さRaの関係で整理した結果を図13に示す。増幅方法が異なるので2本の直線となるが、両方法とも表面粗さRaはラップの共振周波数1.3kHzの音響レベル値によって監視が可能であることを示している。

Fig.13 Relationship between sound pressure level and surface roughness

6. 結 言

ラッピングが進行しているとき、砥粒とラップおよび加工物で発生する可聴音から、熟練者は加工が正常に営まれているかを判断している。この可聴音を選択してマイクロホンで検出できれば、加工状況の監視が熟練者の勘と経験に頼らず、数値で表現でき共通な判断基準が得られる。

本研究では、加工中に発生する1~3kHzの振動音をマイクロホンで検出するため、単純指数関数ホーンで振動を増幅する方

法と、気柱の共振を用いる方法とについて検討し、以下の結果を得た。

- (1) ラップ装置に簡単な加工をするだけで実施可能な、マイクロホンによる非接触加工監視法を提案した。
- (2) ラッピング中の特定周波数の発生振動、発生音を、ホーンあるいは気柱の共振により増幅することができた。
- (3) 加工に伴う振動周波数域内にラップの固有振動数に相当する定在波が発生する場合でも、その周波数の音響レベル値から加工面の監視ができる。
- (4) 修正リングの共鳴音は加工物状況には直接の関係がないので測定上除去する必要がある。
- (4) 気柱の振動を利用する場合は、共振の選択度Qが過度に鋭いので、気柱の共振周波数と監視用周波数とは一致させない方がよい。本研究の場合、それらの差が0.3kHzとなるよう設定し、良好な結果を得た。

参 考 文 献

- 1) 長田 佐, 大内英俊, 河西敏雄: 圧電セラミックセンサによる研磨加工中の監視 (第1報) - 加工条件と発生音響の関係 -, 精密工学会誌, 62, 6 (1996) 881.
- 2) 樋口誠宏, 矢野章成: 研削砥石の音響放射特性 - 研削音に関する基礎的研究 (第1報) -, 精密機械, 47, 3 (1981) 33.
- 3) 樋口誠宏, 矢野章成: 研削音による加工状態の診断 - 研削音に関する基礎的研究 (第2報) -, 精密機械, 49, 8 (1983) 81.
- 4) 一宮亮一, 知久一佳, 相地 誠: 切削加工における騒音の解析 (第1報) - 単刃工具による金属切削時の音圧レベル -, 精密機械, 49, 3 (1983) 95.
- 5) 長田 佐, 大内英俊, 河西敏雄: 金属ラッピングにおける発生振動周波数-振動モデルによる検討 -, 精密工学会誌, 65, 5 (1999) 684.
- 6) 長田 佐, 大内英俊, 河西敏雄: 圧電セラミックセンサによる研磨加工中の監視 (第2報) - 円すいホーンを利用した音響検出 -, 精密工学会誌, 63, 12 (1997) 1709.

編集後記

今回の特集は「最先端薄膜技術」でした。薄膜については多方面に應用が広がっていて、編集委員の中でもしゅう動部へのコーティングを思い浮かべる人や、半導体で使われる薄膜を思う人などがいて、イメージが分かれました。イメージが分かれるということは、それを全部まとめた特集を組めばきつとおもしろいものになるだろうと考え、特集を組むことにしました。

展望「薄膜技術の最先端」では、薄膜製作技術と応用分野の広がりについて分かりやすく整理していただいています。

次に続く三つの解説「ECR プラズマを用いた高品質薄膜形成」、「大気圧プラズマによる超精密加工と高速成膜」、「PBII (Plasma-Based Ion Implantation) 法による高密着性薄膜の形成」では、最近発展してきた薄膜形成の方法を中心に、その応用も含めて解説していただきました。

「切削工具用コーティング膜の進歩」、「自動車エンジン部品への

耐摩耗性コーティングの應用」では、耐摩耗性向上、摩擦低減という面での具体的應用と効果について詳しく解説していただきました。

「薄膜メンブレン上の微細パタン形成技術」では、薄膜そのものを構造体として用いるという、少し変わった應用について解説していただきました。

「DLC 膜、cBN 膜のトライボロジーとその應用」では、摩擦や摩耗が低減される原理についての解説をしていただくとともに、種々の應用についても解説していただきました。

以上の展望と解説から、薄膜技術が幅広い工学技術分野の基礎を支える技術として、それぞれの分野で実用化されていて、日々改良が進んでいるということが分かりました。また、エネルギー問題、環境問題等の面からもさらなる研究が必要な重要技術であるという印象を強く持ちました。

最後になりましたが、難しい技術の内容を分かりやすくまとめていただいた執筆者の皆様に感謝いたします。(森田博文)