ホーニング音の研究*

—音圧と加工状態の関連性—

上 田 隆 司** 小 沢 功 敬*** 山 本 明**

Investigation on Honing Sound
—Correlation between Sound Pressure
and Abrading Action—

Takashi UEDA, Katsunori OZAWA
and Akira YAMAMOTO

The machining noise produced in honing operation is called honing sound. The purpose of this paper is to investigate experimentally the characteristics of this sound, the correlation between its sound pressure and abrading action, and the influence of the stone pressure on it. Moreover, some discussions are had to find how collectly the honing sound monitors the cutting action of sticks. The results are as follows. This sound varies with time both in frequency and magnitude, and its spectrum has the maximum peak at about 1 200 Hz. Its sound

pressure is much higher than that of turning noise or grinding one. When the sticks keep the condition of self-dressing and cutting, the honing sound with high sound pressure is produced, but as soon as they start to glaze, its magnitude becomes small. Therefore, the soud pressure is higher under severer honing conditions. Particularly, it increases greatly when the stone pressure is just beyond the critical one. The honing sound is positively applicable as a signal to monitor the cutting action of sticks, because the strong correlation is observed between its sound pressure level and the depth of cut of a stick.

Key words: honing operation, honing sound, sound pressure, abrading action, frequency spectrum, monitor signal

1. 緒 言

工作機械において加工中に発生する加工音は生活環境や作業環境の面からはできうる限り低減させるべき騒音であるが、一方、この中には加工状態に関する多数の情報が含まれており、たとえば、熟練工は切削音や研削音により加工状態を知り、さらに工具の摩耗状態も判定している。また、生産能率や加工精度を向上するため切削や研削などの適応制御が進められているが、その監視技術として加工音を応用する試みも数多くなされてきている^{1)~6)}。

ホーニング加工では、砥石の作業状態が脱落期、破砕期、摩耗期と変化してゆく特殊な加工形態を示すため、適応制御を行うためには、加工状態をインプロセスで正しく把握しながら最適状態にコントロールする必要がある。しかし、現在のところ適切な把握手段がなく、このことがホーニング加工の適応制御実現の大きな障害となっている。一方、ホーニング加工では、加工中にこの加工法特有のかん高い加工音を発生することはよく知られている。このため、作業者は耳栓をして作業しなければ

ならない場合が多く、作業者の安全性、健康管理などの点で大きな問題となっている。また、工場のまわりの生活環境に及ぼす影響も大きく、夜間の作業を中止しなければならないなど生産性の面からも大きな障害となっている。

旋削加工や研削加工における振動は加工材料の仕上精度や工具寿命に悪影響を及ぼすため、これまで数多くの研究がなされてきた。これに対し、ホーニング加工における振動は加工材料の仕上面性状に及ぼす影響が小さく、仕上精度にはほとんど影響しないため、これまで研究された例は少ない⁷⁾。

そこで本研究では、加工音が特に激しいパイプ材のホーニングを取りあげ、その発生機構を解明することにより、ホーニング音と切削機構との関連性を見出し、ホーニング音を適応制御のための監視信号に応用する方法を検討する。また、発生機構の解明はホーニング音抑制のための手段を見出す手掛かりともなる。本報では、その基礎データとして、ホーニング音の音圧と加工状態の関連性について調べ、音圧による加工状態の監視の可能性について検討した。

2. 研 究 方 法

2.1 実験装置と測定方法

実験は縦型定圧式内面ホーニング盤（千嶋工業 CVA-

* 原稿受付 昭和 59 年 2 月 7 日。昭和 58 年度関西地方定期学術講演会（昭和 58 年 7 月 13 日）にて発表

** 正 会 員 大阪大学基礎工学部（豊中市待兼山町 1-1）

*** 学生会員 大阪大学基礎工学部

Fig. 1 Equipments to measure honing sound

Fig. 2 Main part of honing machine

500 S)を用いて行った。砥石軸の回転速度および往復速度は油圧で与えられ、無段に調節することができる。図1に実験装置ブロック線図、図2にホーニング盤主要部の外観を示す。加工物は上下両端面をホルダ板①、②ではさみ、ボルトで固定している。ホルダ板①は2本の鉄柱⑤で支えられており、ホルダ板②はテーブル上のブロック③、④に固定されている。ブロック③を移動することによって加工物の支持剛性を変化できる。

測定量はホーニング音、加工物の振動加速度、切削抵抗、および、加工後の切削量、砥石損耗量、仕上面粗さである。ホーニング音はJIS 8713によりホーニング盤砥

Table 1 Honing conditions

Honing speed $\bar{V}$ m/min	30, 45, 60
Crosshatch angle 2θ deg	15, 30, 60
Operating length L m	100
Over-run a mm	33

石軸より1 m、床より1.2 mの位置に設置した1/2インチコンデンサマイクロホンによって検出し、精密騒音計(JEIC 1030, 測定周波数20~20 000 Hz)で測定した。測定信号は一旦データレコーダ(TEAC R-410)に記録した後、FFTアナライザ(小野測器CF 400)で解析した。なお、騒音計による聴感補正は行っていない。切削抵抗は3分力のうち、回転方向成分、往復運動方向成分を図1のホルダ板①に貼付したストレインゲージによって検出し、砥石押付方向成分は直接測定できないため砥石台拡張油圧をひずみゲージ式圧力変換器を用いて測定し、力に換算した。砥石損耗量はダイヤルゲージ(最小目盛1 μ m)で、切削量は内径差をシリンダゲージ(最小目盛1 μ m)で測定した。

2.2 実験条件

加工条件を表1に示す。加工材料の円筒度に大きく影響するオーバーランは経験則によって砥石長さの1/3の33 mmとした。

加工材料には炭素鋼S45Cを中ぐりして作ったパイプ(HV 177, (外径88, 内径60)×200 (mm))を用いた。材質を均一にするため850~900°Cに1 h保持した後炉冷焼きなましている。

砥石は気孔中にイオウを78.4%充てんしたビトリファイドボンド砥石WA 150 JVHD ($V_p=44.9\%$, $V_G=42.7\%$, $V_B=12.4\%$, RH硬度32.1, 形状10×10×100 (mm))を用いた。

加工油は極圧添加剤を加えたスピンドル油(マークホーンCK-100, 日本グリース(株)製)を6 L/min供給し、ガラス繊維を用いたフィルタで切りくずや脱落砥粒を除去した。

2.3 測音環境

室内で音を測定するとき、室内にできる音場は音源から来る直接音と、まわりの壁で反射されてくる反射音を加え合わせたものとなる⁸⁾。音の反射は部屋の大きさや壁の状態、置物等で大きく異なってくる。図3に実験室の平面図を示す。マイクロホンの設定位置を加工材料の中心Oから距離 r 、角度 α で表す。 $\alpha=0^\circ$ がホーニング盤の正面である。

距離 r が音圧レベル(SPL)に及ぼす影響を調べた結果が図4(a)である。音源からの直接音だけが室内の位置によって異なり、反射音は室内に一樣に分布すると仮定すると、半自由音場において点音源から直接マイクロ

Fig. 3 Plane of laboratory showing arrangement of machine tools and surroundings

ホニに達する直接音による音圧レベル SPL_d は, PWL を音源の出力レベルとすると

$$SPL_d = PWL - 20 \log r - 8 \quad (1)$$

一方, 反射音による SPL_r は,

$$SPL_r = PWL - 10 \log R + 6 \quad (2)$$

ここで, R は部屋の Room constant であり,

$$R = \frac{\bar{\alpha} S}{1 - \bar{\alpha}} \quad (3)$$

ただし, S は部屋の内壁全面積, $\bar{\alpha}$ は平均吸音率である。したがって, 室内の音圧レベルは式 (1) と (2) の和によって与えられ,

$$SPL = PWL + 10 \log \left(\frac{1}{2\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (4)$$

音源の PWL および R がわかれば SPL を求めることができる。ところが, 実際の音源は点ではなく, ホーニング盤本体による反射もあり, また図 3 のように実験室は

形状や表面状態が複雑で多数の工作機械が置かれていることから, 詳細な検討はむずかしい。そこで, 図 4 (a) の測定結果を式 (4) に適用し, 逆算して $PWL=99$ dB, $R=15$ m² と定めた。この値を式 (1), (2), (4) に適用して計算した結果が図 4 (a) の曲線である。計算結果は測定結果とよく一致していることから, これらの値が妥当であることがわかる。 R の値から $\bar{\alpha}$ を逆算すると, $\bar{\alpha}=0.05$ となり, 測定環境は反響のよい状態にあるといえる。また, 図より, $r>0.8$ m では反射音が支配的であり, $r<0.8$ m では直接音の影響が大きくなっていく。本研究では JIS 規格より $r=1$ m としており, 直接音よりも反射音が大きい領域で測定していることになる。

図 4 (b) は測定方向 α の影響を調べた結果である。 $r=1$ m としている。 α が負の領域では図 3 よりマイクロホンの直後に壁があるため, 反射音の影響が大きくなっている。 $\alpha=0\sim45^\circ$ の領域で音圧がほぼ一定であることから, 本実験では $\alpha=30^\circ$ の位置にマイクロホンを設置することにした。

3. 実験結果

3.1 ホーニング音の音圧波形

ホーニング音の音圧波形の一例を図 5 に示す。(e) の矩形波は砥石軸の運動状態を表しており, 上辺は軸の上昇, 下辺は降下状態にある。(a) $P_n=0$ kPa は無負荷時の騒音であり, モータ等の機械音によるものである。(b) $P_n=190$ kPa は砥石臨界圧力 P_c 以下であり, 時折小さな音を出す程度で, 音圧波形は所々わずかにふくらんでいるにすぎない。ところが, P_n を増加して P_c 付近の (c) $P_n=460$ kPa とすると, ホーニング音は連続的に出るようになり, (d) $P_n=750$ kPa では音圧は一段と高くなっている。しかも, 時間に対して一様ではなく, 断続的に高くなっている。この図では砥石軸が上昇限界点付

近に来たとき周期的に高くなっているが, この傾向は共通するものではなく, たとえば (c) では別の位置で高くなっており, ホーニング音の発生機構が複雑であることを示している。

音の発生が一様でないため, FFT の加算平均機能を用いて 5.12 s 間のホーニング音を周波数分析した結果が図 6 である。 $P_n>P_c$ における結果を暗騒音および無負荷時の結果と比較して

Fig. 4 Variation of sound pressure level in laboratory as a function of position from sound source

Fig. 5 Examples of sound signals
 $\bar{V}=30$ m/min, $2\theta=30^\circ$, $L=100$ m, WA 150 J(S)

Fig. 6 Frequency spectrum of typical honing sound
 $\bar{V}=30$ m/min, $2\theta=30^\circ$, WA 150 J(S)

いる。500 Hz 以上の周波数帯域では後の 2 つの音圧は十分低く、ホーニング音の解析の妨げとはならないことが

Fig. 7 Variation of honing performance as operation proceeds
 $\bar{V}=30$ m/min, $2\theta=30^\circ$, WA 150 J(S)

わかる。ホーニング音は 1200 Hz 付近に最大ピークを持ち、その 2 倍音、3 倍音、4 倍音、…が 2500 Hz, 3700 Hz, 4900 Hz, …に規則的に現れている。また、800 Hz 付近にもピークがあり、その 2 倍音が 1600 Hz に現れている。もう 1 つのピーク 380 Hz はモータの回転音によるものである。ホーニング音は基本的にはこのような傾向をもっているが、音が断続的に変化するため、いつもこのように明りょうに 2 次以上の高次のピークが現れるとは限らない。また、ピークの位置も多少変化するため、詳細な検討は今後の研究にゆずり、ここでは 0~500 Hz, 500~1000 Hz, 1000~2000 Hz, 2000~5000 Hz といった広い周波数帯域の音圧の変化を追うことにする。

3.2 加工進行に伴うホーニング音の変化

ホーニング加工では砥石圧力 P_n の影響が大きく、臨界圧力 P_c を境にして加工状態が大きく変わる。図 7 は $P_n > P_c$, $P_n < P_c$ の場合を比較しているが、 P_c 以上の砥石圧力では砥石は脱落状態にあるため自生作用が活発となり、砥石損耗量 ΔS や切削量 ΔD が直線的に増してゆく。これに対し、 P_c 以下の圧力では砥石は加工初期に切削状態にあるが、次第に切れ味は低下してゆき、ついには磨き状態となる。このため、 ΔD も飽和する形となる。

このときの音圧レベルの変化を調べたものが図 8(a) である。音圧レベルは 5.12 s 間の平均をとっている。 $P_n=760$ kPa, 590 kPa が P_c 以上、 $P_n=390$ kPa, 180 kPa が P_c 以下の場合である。 $P_n > P_c$ では多少変動はあるものの、高い音圧レベルではほぼ一定となっている。これに対し、 $P_n < P_c$ では加工進行とともに急激に低下している。したがって、音圧レベルと加工状態の間には密接な関連性のあることがわかる。

このときの 0~5000 Hz 間の周波数帯域別の変動を調べた結果が図 8(b) である。 $P_n > P_c$, $P_n < P_c$ いずれの場合も 1000~2000 Hz の音圧レベルが格段に大きく、ホーニング音の音圧の大部分を占めていることがわか

Fig. 8 Variation of sound pressure level as operation proceeds
 $\bar{V}=30$ m/min, $2\theta=30^\circ$, WA 150 J(S)

る。0~500 Hz はモータの回転音が支配的であるため、ほとんど変動していない。一方、 $P_n < P_c$ では加工が進行すると、減衰した500~1000 Hz, 2000~5000 Hzの音が不規則に変動するようになるが、全体の音圧レベルからみればその影響はきわめて小さい。なお、5000 Hz以上の帯域は音圧レベルが小さいため、検討の対象とはしなかった。

3.3 砥石圧力の影響

図9は砥石圧力 P_n が加工性能、およびホーニング音の音圧レベルに及ぼす影響を調べた結果である。前図でみたように、加工距離 L で音圧レベルが変化するため、 $L=100$ mにおける値をとっている。砥石が急激に損耗し始める圧力が臨界圧力 P_c であり、この圧力を境にして砥石が磨き状態から脱落切削状態となるため、図(a)のように切削量 ΔD は急増して、生産性は大いに向上する。しかし、 P_c 付近で極大となっている仕上比 $G (= \Delta D / \Delta S)$ は小さくなり、仕上面粗さ R_a も粗くなる。このため、ホーニング加工では P_n の設定が大切であり、 P_c はこのときの目安となる重要な値である。一方、ホーニング音の音圧は図(b)のように P_n が大きくなると共に高くなる傾向にあり、特に P_c を境にして大きくはね上がっている。前節の結果も合わせて考えると、ホーニング音は砥石が脱落切削状態にあるとき音圧が高くなると結論することができ、音を聞くことにより、簡単に現在の加工状態を判定することができる。

周波数帯域別にみると、 $P_n < P_c$ では0~500 Hzのモータによる騒音が支配的であるが、 P_c 付近からはかの帯域の音圧も高くなり始め、 $P_n > P_c$ では1000~2000 Hzの

音がホーニング音を支配している。また、500~1000 Hzの成分も P_c を越えると10 dB程度はね上がっている。

なお、ホーニング速度、交差角、加工材料長さなどの加工条件の影響については次報で詳しく検討する。

3.4 他の加工法の加工音との比較

図10は標準的な加工条件における種々の加工法の加工音を比較したものである。旋削、フライス、研削では無負荷時と加工時に大きな差がなく、加工音を取り出すためにはマイクロホンに近づけなければならないなど制約が大きくなる。これに対し、ホーニング加工では加工条件の差によって音圧レベルに大きな差があり、信号としてすぐれていることがわかる。また、騒音の観点からみれば、ホーニング

音は特に環境に及ぼす影響が大きいことがわかる。

3.5 音圧レベルと砥石切込み深さの関係

決められた時間内で効率よく、しかも精度よく仕上げるためには加工の進行状態を正確に把握する必要がある。ところが、ホーニング加工は基準面を持たない加工であり、また、砥石損耗も激しいため、研削加工や旋削

Fig. 9 Influence of stone pressure on sound pressure level
 $\bar{V}=30$ m/min, $2\theta=30^\circ$, $L=100$ m, WA 150 J(S)

Fig. 10 Comparison of sound pressure level of honing sound with those of other machining sounds () showing operating conditions in Table 2

Table 2 Operating conditions for Fig. 10

	Turning	Milling	Grinding	Honing
Tool	Carbide	Carbide	A 64 K	WA 150 J(S)
$\bar{V}$ m/min	145.3	64.9	1800	30
Remark	0.2 mm/rev	200 mm/rev	10 m/min	$2\theta = 30^\circ$
Depth of cut (1) 0 mm, (2) 0.5 mm, (3) 1.0 mm, (4) 0 mm, (5) 1.0 mm, (6) 2.0 mm, (7) 0 μ m, (8) 10 μ m, (9) 15 μ m, (10) 20 μ m				
Stone pressure (11) 0 kPa, (12) 340 kPa, (13) 460 kPa, (14) 600 kPa				

加工のように加工中の工具切込み量を把握することはむずかしい。そこで、音圧レベルと砥石の切込み深さ $\bar{d}$ の関係を調べた結果が図 11 である。 $\bar{d}$ は加工実験により加工材料半径減少速度 $d(\delta R)/d\tau$ を求め、文献 10) における式 (11) に代入して求めている。なお、図 7, 8, 9 より、切削が一定速度で行われている ($d(\delta R)/d\tau = \text{一定}$) とみなしうる 85 dB 以上の状態を扱っている。

図 11 より、切削速度 $\bar{V}$ や交差角 2θ に関係なく音圧レベルと $\bar{d}$ の間に十分な相関があり、ホーニング音を加工の進行状態を監視する簡便な信号として用いることができる。しかし、ホーニング音には種々の原因による音が含まれているため、データにばらつきがあり、切込み量を完全にコントロールすることはできない。

4. 結 言

加工中に発生するこの加工法特有のホーニング音に注目し、その特性や音圧と加工状態の関連性について調べるとともに、加工状態を監視する信号としての可能性について検討してみた。得られた主な結果は次のようである。

- (1) 1 200 Hz 付近に最大ピークをもち、たえず音質や音圧を変化させる。
- (2) 旋削や研削などの加工音に比べ格段に音圧が高

Fig. 11 $\bar{d}$ -SPL relation
WA 150 J(S), S 45 C

い。

- (3) 砥石の作業状態と密接な関連があり、脱落切削状態にあるとき音圧は高く、磨き状態になると急激に低下する。
- (4) したがって、砥石圧力が大きくなるほど音圧は高くなり、脱落切削に移行する臨界圧力を境にして大きくはね上がる。
- (5) 音圧レベルと砥石切込み深さの間には十分な相関があり、加工の状態を把握するための信号として使うことができる。

終わりに、本研究に協力された卒業生の羽嶋範昭（東洋曹達）、村井匡（日立造船）両君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 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），精密機械，**49**，3 (1983) 377.
- 2) 神田雄一：切削と音，機械と工具，**7** (1981) 61.
- 3) 竹山秀彦，山崎和雄，沢井信重：切削音による工具摩耗のインプロセス測定，精密機械，**42**，11 (1976) 1063.
- 4) 西村源六郎，高橋浩一：研削音の研究，精密機械，**30**，8 (1964) 629.
- 5) 樋口誠宏，矢野章成：研削砥石の音響放射特性，精密機械，**47**，3 (1981) 297.
- 6) M. Ikeda and K. Machida: Analysis of Machining Noise in Lapping, Ann. CIRP, **21**, 1, (1972) 91.
- 7) 坂田興亜，M. M. サディク：薄肉円管の内径ホーニング中における振動挙動，精密機械，**49**，4 (1983) 415.
- 8) 例えば，守田 栄：音響工学入門，アース社 (1981) 85.
- 9) 山本 明，上田隆司：ホーニング用処理砥石におけるイオウの働きについて（第 1 報），精密機械，**43**，3 (1977) 305.
- 10) 上田隆司，山本 明：ホーニング機構に関する一考察，精密機械，**48**，11 (1982) 1514.