切削加工における騒音の解析 (第1報)*

——単一刃工具による金属切削時の音圧レベル——

一 宮 亮 一** 知 久 一 佳*** 相 地 誠†

Analyses of Noise emitted in Cutting
Operation (1st Report)

—Sound Pressure Level in Metal Cutting with
a Single Point Cutting Tool—

Ryoichi ICHIMIYA, Kazuya CHIKU
and Makoto AICHI

The purpose of this paper is to clarify the characteristics of cutting noise and noise sources in metal cutting with a single point cutting tool. When a cylindrical workpiece is machined with a lathe, the sound pressure level and frequency analyses were measured. Effects of overhang length of the cutting tool, cutting condition, tool wear, work material and shape of the workpiece on the

cutting noise analyses were experimentally made clear. Two prominent peaks of the sound pressure level were observed from the frequency analyses of cutting noise at the frequencies of around 4000 Hz and 10 000 Hz. The former peak is caused by the vibration of the cutting tool system and the sound pressure level at the frequency increased with the increase of tool wear. The latter peak is affected by the workpiece system and the frequency of the peak varied with the decrease of wall thickness in pipe cutting with a lathe.

Key words: metal cutting noise, frequency analysis, sound pressure level, tool wear, work dimension.

1. 緒 言

高速切削や重切削の進展と共に、金属切削時における騒音レベルは次第に高くなる傾向を示している。切削時における騒音を大きく二つに分けると、工作機械本体及びその付属装置を運転すること起因する騒音と、切削現象に伴う工具、切りくず、加工物等からの騒音である。前者の騒音については主として実験面から多くの報告^{1)~3)}が見られる。更に、工作機械の内部音源となっている歯車や軸受の騒音についても、それぞれ以前から国内外で多くの研究⁴⁾⁵⁾が行われてきた。最近の工作機械は省力化及び高精度化のため、油圧装置をはじめとする種々の付属装置を有する場合が多く、これらからの騒音も大きくなっている⁶⁾。後者すなわち切削現象に伴う騒音についてはその報告はきわめて少ない。薄い砥石やフライスによる切断加工においては、工具の振動音が大きく、その対策が報告⁷⁾されているが、切削現象における騒音発生の基礎的な研究が必要とされている。切削音は、内部に音源をもつ工作機械騒音に比べて、約2 000 Hz以上の高い周波数領域における音圧レベルが高いために産業性難聴等の原因になりやすく、作業者や環境に与え

る影響が大きい。そのため切削音の基礎的研究が必要であり、更に切削音の音圧レベルを低下させる有効な対策も必要とされている。

そこで本論文は切削音の発生要因を解明するために、まず単一刃工具を用いて金属加工物を旋削したときの音圧レベルを測定し、被削材形状及び工具の寸法変化の影響、加工条件と音圧レベルの関係、工具ホルダの振動加速度と音圧レベルの関係を明らかにし、更に振動加速度と切削音の周波数分析を行い、種々の工具摩擦が音圧レベルの周波数分析に及ぼす影響を明らかにし、音源寄与率も計算して金属切削における切削音の特性とその発生源を解明するものである。

なお、本研究の長手旋削加工においては、びびり振動が発生しないような条件を用いた。びびり振動と切削音との関係については後報にゆずることとする。

2. 実験方法と条件

実験には主電動機出力5.5 kW、最大心間距離900 mmの普通旋盤を使用し、丸棒被削材の一端をスクロールチャックで固定し、他端は回転センタで支持する。常に同一状態で切削を行うように被削材とチャックの相対位置や、心押軸突出長さは一定とした。図1は実験装置の概略図である。切削音は工具刃先近くに設置したコンデンサマイクロホンに集音し、精密騒音計、周波数分析器、レベルレコーダに導き、音圧レベル及び周波数分析結果を記録した。なおマイクロホンには被削材の回転による

* 原稿受付 昭和57年7月2日。精機学会東北支部米沢地方講演会(昭和57年6月5日)にて発表。

** 正 会 員 新潟大学工学部(新潟市五十嵐2の町8050番地)

*** キヤノン(株)(東京都大田区下丸子3-30-2)

† 大日本印刷(株)(東京都新宿区市谷加賀町1-12)

Fig. 1 Block diagram of experimental set-up

Fig. 2 Frequency analyses of typical noise

風の影響を防止する防風スクリーンを取り付けた。更に切削中の工具の振動加速度と音圧レベルの関係を求めるために、工具ホルダ裏面の先端近くに振動加速度ピックアップを固定し、切削中の振動加速度を測定した。更に切削音はデータレコーダに収録し、スペクトラムアナライザにより波形解析や音源寄与率の計算に用いた。

切削は超硬工具による乾式切削であり、工具オーバハング長さは種々変化させて周波数分析結果に及ぼす影響を調べたが、特に指定しない場合は 32 mm の一定とした。バイトホルダ断面は 19×19 mm である。被削材の材質は炭素鋼 (S 45 C)、鋳鉄 (FC 20)、アルミニウムである。

図 2 は暗騒音、旋盤の空運転音、及び旋盤の運転音と切削音の合成された音（以下切削合成音という）の 3 種類の周波数分析結果を示す。暗騒音は周波数 200 Hz 以上の領域においては切削合成音に比べて 10 dB 以上低いので、暗騒音は無視して良いことがわかる。図から明らかに約 1 000 Hz 以下の周波数においては空運転音と切削合成音の音圧レベルはほとんど差が無いことが

わかる。したがって、切削のみによって発生する騒音（以下切削音という）の音圧レベルは、音響出力の和の計算から 1 000 Hz 以下においては空運転音に比べて少なくとも 3 dB 以上低いことがわかる。しかし、約 1 000 Hz 以上の高い周波数域においては切削合成音の音圧レベルが高く、特に 4 000～5 000 Hz 付近に高いピーク値（A ピークという）が観察される。更に 10 kHz 前後においても音圧レベルが高くなる（B ピークという）現象が見られる。このように高い周波数域にお

いては切削合成音と空運転音の音圧レベル差は 10 dB 以上になっているために、切削合成音は切削音とみなすことができる。

更に切削時における工具の振動加速度の周波数分析も同時に行ったが、切削合成音の周波数分析よりも一段とはっきり A 及び B の両ピークが現れることが明らかになった。

切削時において工具の振動により工具から発生する音のパワーが観測点において測定した切削合成音の全パワーに対してどの程度の割合で寄与しているかを知るため音源寄与率を以下の方法により求めた。いま、工具の振動に起因する音を $x_A(t)$ 、観測点で測定した切削合成音を $x_B(t)$ 、 $x_A(t)$ のパワースペクトルを $G_{AA}(f)$ 、 $x_B(t)$ のパワースペクトルを $G_{BB}(f)$ とし、 $x_A(t)$ と $x_B(t)$ のクロススペクトルを $G_{AB}(f)$ とすると音源寄与率 β は次式⁸⁾によって示される。

$$\beta = \frac{\int |G_{AB}(f)|^2 df}{\int G_{AA}(f) df} \quad (1)$$

工具締付けトルクが音圧レベルに及ぼす影響を調べるため、種々の締付けトルクにおいて切削し切削合成音を周波数分析した結果、トルクが 30 Nm 以下では A 及び B 両ピークの現れる周波数付近において変動が見られ、不安定な要素をもつことが明らかになったので、変動の見られない 50 Nm 以上の締付けトルクを用いて実験を行った。

工具の固定状態が変化すると固有振動数が変化して周波数分析結果に影響を及ぼすため、図 1 に示すような固定状態をすべての実験において常に採用した。

空運転時における旋盤から放射される騒音と、切削時において旋盤から放射される騒音との違いを調べるため、旋盤主軸のチャックに取り付けた丸棒に電磁ブレーキを接続させ電流を変化させることにより、種々の切削

Fig. 3 Comparison of experimental and calculated results

状態における切削抵抗と同じトルクを付加することにした。マイクは図1に示したのと同様に工具刃先近くに置き、旋盤からの騒音を測定した。その結果旋盤の回転数の低い範囲では、トルク付加の影響が現れ、トルクの増加と共に音圧レベルは増加する。しかし回転数が高くなるとトルクの影響は次第に小さくなり、本実験に用いた切削条件による切削抵抗の範囲内においては音圧レベルのオーバオール値でも1.5~1.8 dB以下であった。

3. 実験結果および考察

切削音に影響を及ぼす主な因子である工具形状、加工条件、加工物形状等と切削音の周波数分析値、音圧レベルのオーバオール値との関連について検討した。切削合成音の音圧レベルは、旋盤の空運転音の音圧レベルと切削音の音圧レベルの二つの合成音であるとみなすことができる。そこで、同一周波数の音の合成理論を用いて、切削合成音と空運転音の測定値から切削音を計算して求めた。これを切削音の実験結果として以下に示す。

3.1 工具オーバハング長さの影響

切削時には工具ホルダが振動するため工具からも騒音を発生している。そこで、工具のオーバハング長さ(図1の L)を20から75 mmまで変化させて切削を行い、切削合成音の周波数分析を行った結果、図3に示すようにオーバハング長さが長くなるほどAピークの現れる周波数は低くなり、更にその周波数における音圧レベル値は上昇することが明らかになった。そこで工具ホルダを断面が長方形の片持棒と仮定し固有振動数を求める式を導くと、一次の固有振動数 f_1 は次のごとくなる。

$$f_1 = \frac{m_1^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2)$$

Fig. 4 Relation between depth of cut, feed and sound pressure level (SPL)

E は棒の縦弾性係数、 I は断面二次モーメント、 ρ は棒の密度、 A は棒の断面積、 $m_1=1.875$ 。

式(2)を用いて f_1 と L の関係を数値計算した結果も図3に示す。 L が短くなると f_1 は著しく大きくなり、Aピークも L が小さくなると高い周波数へ移動する。更に、工具ホルダ断面形状を変化させて、断面二次モーメントを大きくし実験を行ったが、Aピークの周波数は大きくなった。工具の寸法及び形状を変化させることにより周波数及び音圧レベルが変化することから、Aピークは工具系の振動に起因することが明らかになった。図3の計算値と実験値が一致しないのは工具が必ずしも完全な片持棒ではなく、ツールポストも完全な剛体とはいえないこと、ホルダの振動も厳密には非線形振動をしていると考えられること、工具刃先部の形状も複雑なこと等のためである。

3.2 切削条件の影響

a) 切込みと送りの影響

切込みと送りが切削音に及ぼす影響を調べた。切込みを0.1から1.8 mmまで変化させたときの切削音の音圧レベルのオーバオール値を図4(a)に示す。切込みの増加に従って切削音はかなり顕著に増加している。切込みの増加は切削抵抗の増加となり工具から発生する音響エネルギーを増加させ、切削音のレベル上昇をもたらしている。切削音に占める工具振動に起因する音源寄与率を計算すると切込みの増加と共に若干増加することが明らかになった。

更に、送りを0.1から0.7 mm/revまで変化させたときの切削音の音圧レベルのオーバオール値を図4(b)に示す。図から明かなように、送りが増加すると音圧レベルはやや上昇する傾向を示しているが、送りの大きい

Fig. 5 Relation between cutting speed and sound pressure level (SPL)

Fig. 6 Relation between cutting speed and noise source contribution rate

領域においてはレベル増加はほとんど見られなくなる。

b) 切削速度の影響

丸棒被削材の外周面を種々の回転数を用いて切削し、切削速度と切削音の関係を求めた。その結果は図5に示すように切削速度の上昇に従って切削音の音圧レベルは上昇しているが、速度の低い領域での上昇が顕著である。更に工具ホルダに取り付けた振動加速度ピックアップにより工具の振動加速度と切削速度の関係も同時に求めたが、音圧レベルの変化とよく似た傾向を示した。工具の音源寄与率を種々の切削速度に対して求めた結果を図6に示す。切削速度が大きくなるに従って工具の振動加速度が大きくなり、工具から発生する音が切削音の中で次第に大きな割合を占めていくことが明らかとなった。

3.3 工具摩耗の影響

炭素鋼被削材の外周面を切込み0.5 mm, 送り0.15 mm/rev, 切削速度220 m/minの一定条件のもとに切削し、切削開始後種々の切削時間における切削合成音をデータレコーダに収録し、その時々工具の横逃げ面摩耗幅を顕微鏡で測定した。種々の横逃げ面摩耗幅における切削音の周波数分析結果を図7に示す。工具は逃げ面もすくい面も摩耗しているが、切削時間と共に比較的摩耗の進行も顕著であり、音圧レベルとの変化の関係を示すのに適当と思われたので横逃げ面摩耗幅を用いて示した。周波数が低い領域においては工具摩耗の進行による音圧レベルの変化の差異がほとんど認められなかった。高い周波数領域においては摩耗の増加と共に音圧レベルがきわめて顕著に変化する結果が得られたので、図7に

Fig. 7 Frequency analyses of noise for various width of tool wear

Fig. 8 Sound pressure level for flank wear of the cutting tool

は周波数2~20 kHzについて示した。図から明らかなように、特にAピークの現れる周波数においては、摩耗の増加と共に音圧レベルが著しく増加し急峻なピークを示すようになる。また同時に測定した工具ホルダの振動加速度レベルの周波数分析結果も類似しており、Aピーク付近における加速度レベルは摩耗の増加と共に増加した。一方、Bピーク付近の周波数における切削合成音の変化は工具摩耗の増加と共にやや増加しているが、Aピークほど顕著ではない。これらの結果からもAピークにおける切削音は主として工具系の振動に起因して発生するものであるといえる。

図8は工具横逃げ面摩耗幅と音圧レベルのオーバーオール値の関係を示す。オーバーオール値は摩耗の増加と共に

Fig. 9 Sound wave form for various width of tool wear

Fig. 10 Distribution of period for various width of tool wear

増加していることが明らかに示されている。A ピークにおける音圧レベルの増加は、ややばらつきが見られるが、オーバオール値の増加よりも顕著であることがわかる。工具摩耗の増加と工具の音源寄与率を計算すると摩耗幅の増加と共に寄与率は上昇することも明らかになった。

工具摩耗が騒音の波形に及ぼす影響をスペクトラムアナライザにより解析した。まず、図 7 に示したのと同一条件のもとで同一被削材を加工したときの工具摩耗と波形の変化を図 9 に示す。これらの波形の周期度数分布を求めた結果を図 10 に示す。工具摩耗が小さい場合には周期度数は比較的広く分布するが、摩耗の進行に伴い一定の周期値に集中する分布傾向を示している。

また、音の波形の振幅については、波形の正のピーク値から負のピーク値までのレベル差、すなわち両振幅の度数分布を調べると、工具摩耗が小さい時はすそ広がり分布であるが、摩耗が大きくなると一定の振幅値に集中する分布が得られた。

3.4 被削材の影響

3.4.1 被削材材質の影響

Fig. 11 Frequency analyses of noise for various work materials

被削材材質が変化すると切削抵抗は変化し、切削機構も変化する。したがって、被削材材質によって切削音も変化すると考えられる。不連続な切りくずを生ずる鋳鉄 (FC 20)、連続した切りくずの炭素鋼 (S 45 C)、軟らかい非鉄金属であるアルミニウムの 3 種類の被削材について切削合成音の周波数分析を行った。その結果を図 11 に示す。加工条件はいずれも同一とした。すなわち、被削材直径 60 mm、長さ 500 mm、切込み 0.5 mm、送り 0.15 mm/rev、主軸回転数 560 rpm である。A ピーク及び B ピークの現れる周波数は材質が変化しても変わらないが、音圧レベルに大きな変化があることがわかる。特に周波数が 2 000 Hz 以上の高い領域において音圧レベルに大きな違いが見られる。鋳鉄の場合は最も音圧レベルが高く、工具ホルダの振動加速度レベルも最も高い数値を示した。アルミニウムは全周波数にわたって最も低い音圧レベルを示しているが、切削抵抗も低く、連続した切りくずの切削が行われており、工具ホルダの振動加速度も低い数値を示しているためである。

3.4.2 パイプ状被削材の切削

被削材形状が切削音に及ぼす影響を調べるため、炭素鋼 (S 45 C) のパイプ状被削材を切削し、肉厚の変化と切削音の関係について調べた。被削材寸法は長さ 240 mm、内径 40 mm の一定とし、外径 80 mm から次第に切削を行って肉厚を薄くし、それぞれの肉厚時の切削合成音を周波数分析した。肉厚と A, B 両ピークの現れる周波数の変化を図 12 に示す。A ピークの周波数はほとんど変化しないが、B ピークの現れる周波数は肉厚の減少と共に次第に低下することがわかった。

更に、パイプ肉厚と切削合成音のオーバオール値、A ピークの音圧レベル値及び B ピークの音圧レベル値との関係を図 13 に示す。オーバオール値は肉厚の減少に従って次第に高いレベルになることがわかる。しかし、A ピークのレベルは肉厚が変化してもほとんど変化が見

Fig. 12 Relation between frequency and wall thickness of pipe

Fig. 13 Relation between sound pressure level and wall thickness of pipe

られない。また、Bピークのレベルは肉厚が薄くなるに従って上昇し、図によると肉厚が7 mm以下になるとAピークの音圧レベルより高くなり、可聴域の全周波数にわたってBピークの音圧レベルが最も高くなる。薄い肉厚の場合のオーバーオール値の上昇は主としてBピークの周波数における音圧レベルの著しい上昇が影響している。図12及び図13の結果から一般に加工物を旋削したときに現れるBピークは、加工物、チャック、心押しセンタ等を含めた加工物系の振動が影響していると考えられる。薄肉パイプ状の被削材の切削においては周辺の音圧分布に及ぼす音源として工具系よりも加工物系が大きな役割を占めるようになる。

4. 結 言

単一刃バイトを用いて丸棒金属加工物外周面を旋削し、以下の結論を得た。

- (1) 切削音を周波数分析すると、周波数が2 000 Hz以上の高い領域において全般に音圧レベルが高くなり、特に4 000 Hz前後と10 000 Hz前後の周波数において音圧レベルが急上昇する二つのピーク（前者がAピーク、後者がBピーク）が現れる。Aピークは主として工具系の音源によるものであり、後者は主として加工物系の音源によって影響を受けるものである。

- (2) 切削条件の切込み、送り、切削速度と工具オーバーハング長さが大きくなるに従って、切削音のオーバーオール値は上昇する。

- (3) 工具摩耗の成長につれてAピークの周波数における音圧レベルが著しく上昇する。そのため工具系からの騒音の音源寄与率も工具摩耗の増加と共に上昇する。

- (4) 切削音の波形は摩耗幅の小さい切削初期においては多くの周期をもつ音波が分布しているが、切削が進行し工具摩耗幅が大きくなるに従って次第に一定の周期をもつ音波に近づいていく。更に波形の振幅は工具摩耗が小さいときは比較的広い範囲に分布するが、摩耗が大きくなると一定の振幅値に集中する分布となる。

- (5) パイプ状被削材の切削においては肉厚が薄くなるにつれてBピークの周波数における音圧レベルが著しく上昇する。更に肉厚が薄くなるにつれてピークの現れる周波数も低下していく。

- (6) 鋳鉄のようにきわめて小さい不連続な切りくずの出る加工物は、平均切削抵抗が小さくても音圧レベルのオーバーオール値は高くなる。特にAピークの周波数における音圧レベルがきわめて高くなる。

文 献

- 1) M. Weck & W. Melder: Problems in Assessing the Noise Behavior of Machine Tools, Ann. CIRP, **26**, 2, (1977) 397.
- 2) J. Bollinger, J. Peters & P. Vanherck: Practical Treatment of Machine Tool Noise Standards Analysis Control, Ann. CIRP, **24**, 2, (1975) 575.
- 3) N. D. Cirtu et al.: A Survey of the Noise Level of Metal-cutting Machine Tools, Proc. Int. MTDR Conf. 16th, (1976) 363.
- 4) 会田俊夫ほか: 歯車の振動, 騒音に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集, **34**, 268 (1968) 2226.
- 5) 五十嵐昭男: ころがり軸受の騒音とその対策, 日本機械学会誌, **80**, 708 (1977) 1167.
- 6) P. Dransfield, J. S. Stecki & P. Wilkins: Noise in Hydraulic Control Systems, Proc. Noise, Shock & Vib. Conf., (1974) 236.
- 7) H. K. Tönshoff, G. Rohr & H. D. Raschke: Geräuschenstehung und Lärminderung beim Schleifen von Blech, Ann. CIRP, **25**, 1, (1976) 301.
- 8) 石井 泰, 石田正浩: クロススペクトル法による音源寄与率の測定, 日本音響学会誌, **29**, 10 (1973) 619.