

加工音のハーモニクス合成音による作業現場の騒音環境改善

長谷川達郎[#]

名古屋大学 全学技術センター（工学）

概要

本研究は、騒音職場の労働環境改善を目指し、切削加工音に倍音を加えて心地よい音色を創出する新たな手法を提案する。厚労省のガイドラインに従い、騒音障害防止対策が必要とされている一方で、騒音職場は若年就労者から敬遠され、人材の確保が課題となっている。そこで、騒音を心地よい音色に変換し、心理的ストレスを軽減することが目的である。これは、労働環境の改善と労働者の心理的負担の軽減に寄与する可能性があり、騒音問題に対する新たな視点を提供する。

1. 研究背景

ものづくり産業の代表的な切削・研削・プレス加工などの騒音職場では外的要因によるストレスから精神・心理を健康的に維持することと、人体の大切な感覚器官である聴力の保護が重要課題と位置付けられている。このため厚労省の「騒音障害防止のためのガイドライン」によって、騒音障害防止の対策を求められている[1]。具体的には騒音計による等価騒音レベルが一定値以上で作業員に対して聴覚保護具の装着や発生源の特定と作業の見直しが求められている[2]。このような労働環境の現状から若年就労者から敬遠され人材の確保育成が問題となっている[3]。

近年、多くの研究ではAEセンサや加速度センサから得られる振動や機内に設置したマイクで、ビビリ振動や工具欠損などの異常な切削状態の場合を解決する研究が盛んであるが、定常時の切削加工音については研究の対象となっていることが少ない。しかし、作業員の労働環境を考えると常に発生している定常時の切削加工音も十分に不快音と捉えてもいいだろう。また、音響機器分野では周囲の雑音を打ち消すために逆位相の周波数を合わせることでノイズキャンセラする機能が実装されている。しかし、切削加工音の場合、昔から熟練作業員は良い切削状態を判断するため切削加工音を聞きながら切削条件を調整している。この切削加工音は非常に重要な情報であるため逆位相の周波数を与え消去することはできない。そこで本研究では、騒音職場での過酷な労働環境を改善すべく、切削加工音に倍音（ハーモニクス）を合成させることで作業員の耳に心地よい音色にしようとして試みである。

2. 実験装置・方法

図1に示すように、工作機械の操作盤付近に設置したマイクで得られた電圧データはアンプ機能もつオーディオインターフェースにて増幅され、データロガーに送られサンプリングする。また同時にオシロスコープでデータを高速フーリエ変換（Fast Fourier Transform：以下FFTとする）して周波数解析を行う。見つかった特定の周波数を基音として、この基音に対して整数倍の倍音（ハーモニクス）を合成して作業員の周囲に設置したスピーカから響かせる。

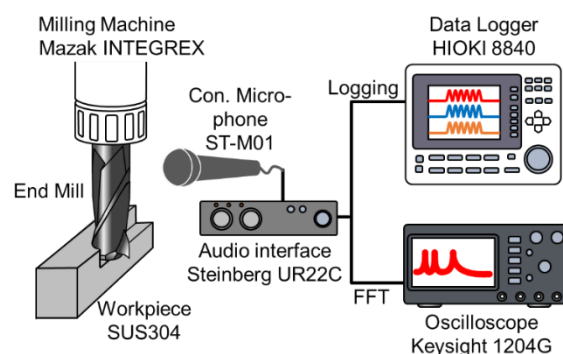


図1. 切削加工音の収録方法と実験装置

3. 周波数特性と評価基準

切削音は、切削加工における重要な情報源であり、切削状態や工具の摩耗などを評価するために利用される。しかし、切削音は、材料の特性や工具の形状や切削条件などの多くのパラメータに影響されるため、実際の生産現場では単一条件で得られる研究室でのデータとは異なる場合が多い。したがって、自社の環境に合致した条件から切削音を予測することが重要な課題となる。本研究では、この課題に対して、事前実験として実験計画という統計的な手法を用いて幅広いパラメータを試すことで、自社の環境に合った切削音を推察する。切削音の発生に影響する因子を選別するために、超硬エンドミルを用いて軸方向切込みを6mmとして、工具径 D ・工具径方向切込み ae ・の切削速度 V の3つを組み合わせた事前実験を実施した。得られた実験データはマイクの電圧値を時系列データとして出力する。周波数解析では高速フーリエ変換（FFT）することで、この時系列データを周波数成分に分解する方法により信号の周波数特性を調べることで、信号の性質や発生源を把握することができる。周波数解析されたデータから、音の高さ（周波数）と音の強さ（スペクトル密度 Power Spectrum Density：以下、PSD値とする）を評価指標とした。

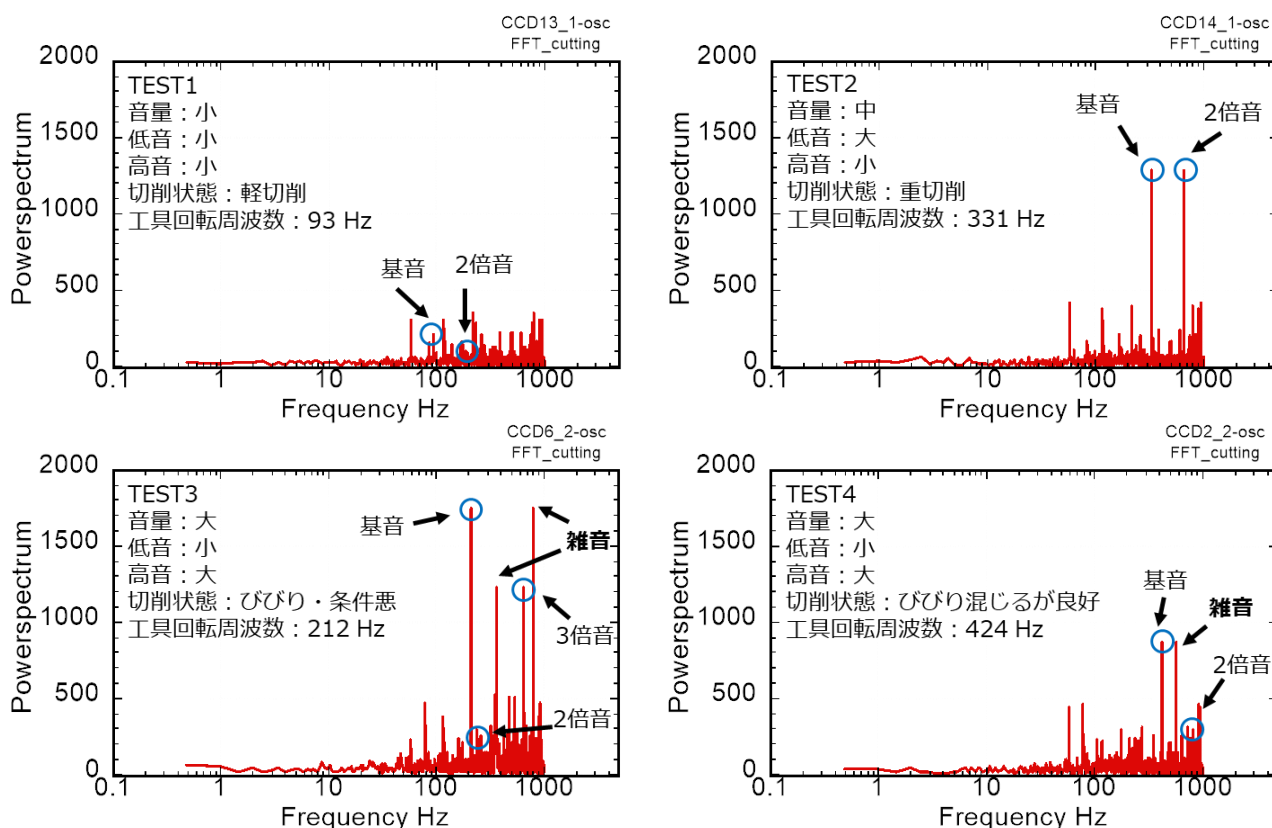


図 2. 事前実験から選ばれた特徴的な切削音

4. SD 法による切削音のイメージ調査

切削音のイメージ調査とは、切削加工時に発生する音に対する感情的イメージを SD 法で評価する手法である。例えば、切削音が「静か」か「うるさい」か、「快適」か「不快」か、などの形容詞の対を用いて、回答者の感情を評価することができる。前出の事前実験から特徴的な切削音を録画した動画を埋め込んだ TEST1～4 (図 2) の切削音について Web によるアンケート調査を行った。一般的に経験年数が高いと、その分野や職種に関する知識や技能が豊富になるが、同時に慣れや偏見が生じる可能性もあることから職場内の評価者から有効な回答があった 7 名について切削音の周波数特性が作業者の感情的イメージと経験年数の関係について分析した。被験者は、切削条件が異なる TEST1～4 の切削音を聞き、それぞれに対して力量性・潜在性・活動性の 3 つの因子で感情的イメージを評価した。評価は、対立する形容詞の対を用いた 5 段階の選択肢で行った。被験者は、機械加工業務に携わる経験年数が異なる 3 つのグループ (A: 0～3 年, B: 3～15 年, C: 15 年以上) に分けられた。

切削音のイメージ調査結果を図 3 に示し、まとめると以下の通りである。

A) TEST1

音量が小さいため、力量性因子はネガティブ側になった。また、グループ C の経験年数が長い (年長者) は音への敏感さが薄れる傾向が見られた。これは、切削加工に関する知識や技能が豊富であることや、音に慣れていることが原因と考えられる。

B) TEST2

定常的で安定しているが重切削のため、どのグループでも全体的にネガティブな感情を示した。これは、重切削が仕上げ面や工具寿命に悪影響を及ぼすことや、切削音のそのものが不快であることが原因と考えられる。

C) TEST3

びびり音 (高音) が発生したため、全グループで評価性・活動性でネガティブな感情がもっとも現れた。これは、びびり音が危険や不安を感じさせることや、音が耳障りであることが原因と考えられる。

D) TEST4

軽度の高音が聞こえるが定常的で安定した切削であった。全グループでネガティブ寄りの同じような結果となった。これは、高音が不快であることや、安定的な切削でも早期に工具寿命に達するリスクがあることが原因と考えられる。

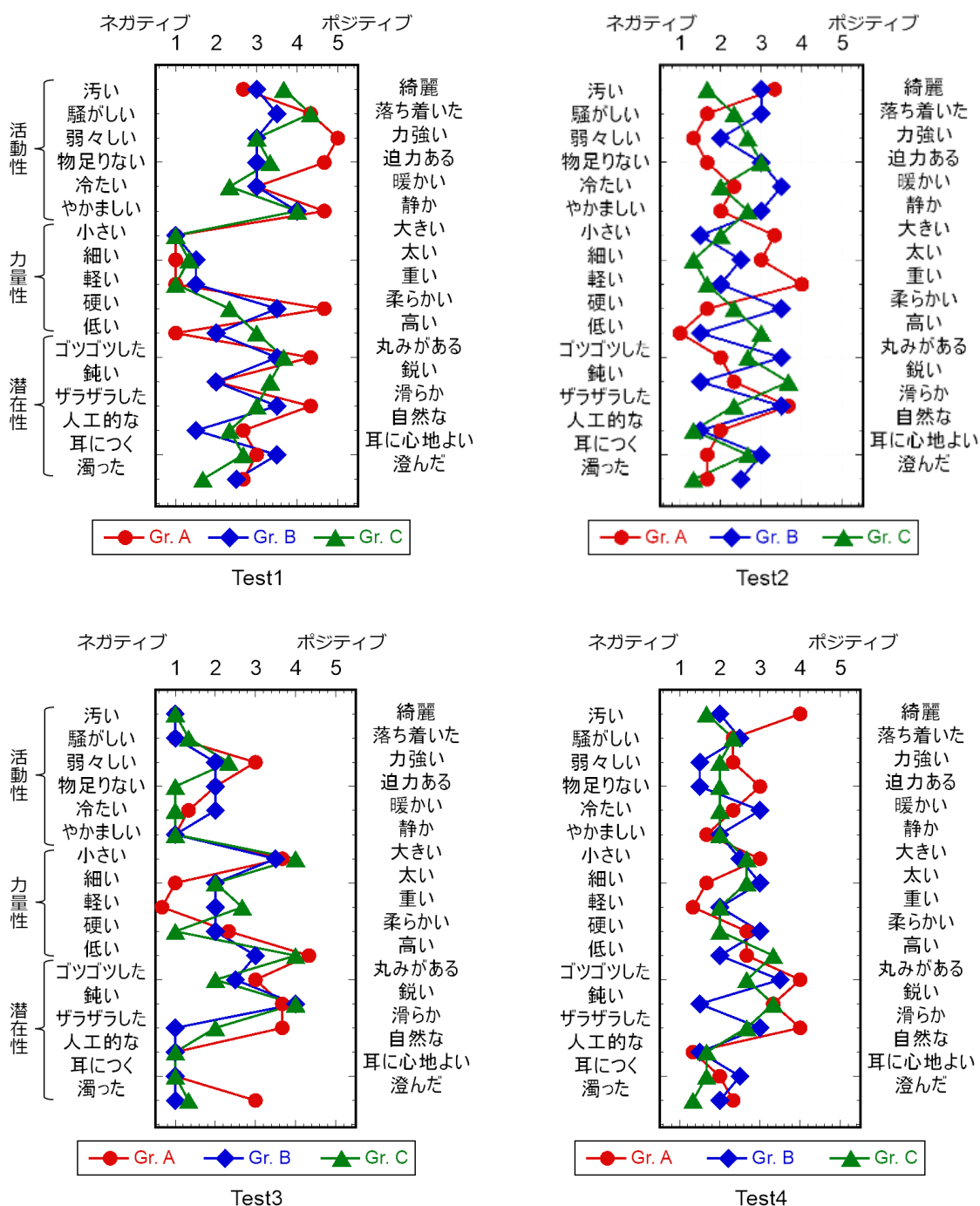


図3. 切削音のイメージ調査の結果

5. 倍音を追加して心地よい切削音「ハーモニクス合成音」の生成

音は人の心や身体に様々な影響を与えることが知られている。特に、心地よい音は人の心理的・身体的な健康や幸福感に大きく寄与するという報告が多数ある。心地よい音とは、音色が豊かで調和的である音であり、人によって異なると考えられる。音色とは、同じ音高でも楽器や声などによって異なる音の特徴のことである。音色は、波形の形や倍音の含まれ方に

よって決まる。倍音とは、楽音の音高とされる周波数に対し、2以上の整数倍の周波数を持つ音の成分のことである。倍音は、楽器や声の響きや色合いを決める要素であり、倍音の強さやバランスによって、同じ音高でも異なる音色に聞こえる。倍音が多くて均等に含まれると、音色が豊かで明るく聞こえ、逆に、倍音が少なくて偏って含まれると、音色が貧弱で暗く聞こえる。また、倍音が整数倍でなくてずれていると、不協和感やひずみを感じる。したがって、倍音と心地よい音の関係は、倍音が多くて均等で整数倍であるほど、心地よい音に聞こえやすいことから、図4にあ

るように基音に対し2倍音, 3倍音に対応する周波数に同等のPSD値を図5のように追加した. これを心地よい切削音「ハーモニクス合成音」と呼ぶ.

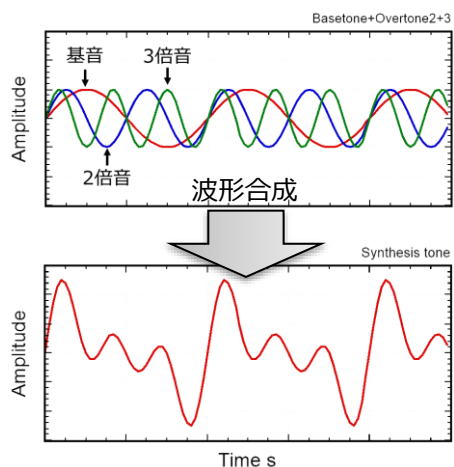


図4. 倍音の合成方法

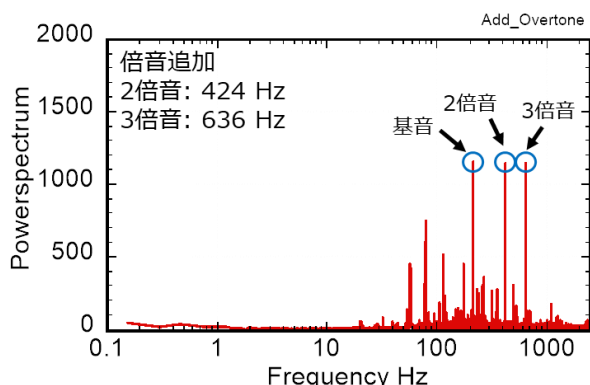


図5. 合成した切削音 (ハーモニクス合成音)

6. ハーモニクス合成音の検証実験

前出の図5で作成した心地よい切削音「ハーモニクス合成音」の周波数データを逆高速フーリエ変換 (Inverse Fast Fourier Transform: 以下IFFTとする) して時系列データに戻す処理した. 検証実験に使用した装置は切削音の収録時に使用したヤマザキマザック製複合加工機(Integrex200-III ST)である. 図6に示すように, この機械の操作盤付近に作業者が滞在

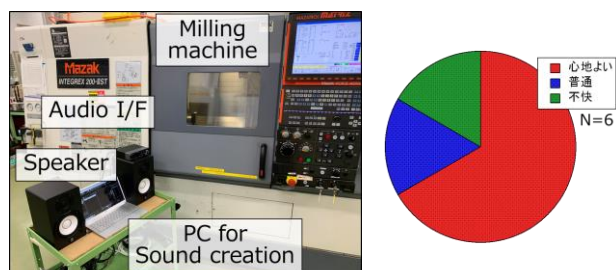


図6. 検証実験とアンケート結果

していると想定してスピーカを設置した. 被削材はステンレス鋼 SUS304 (JIS) を使用し, 切削工具はMOLDINO社製エポック SUS マルチ レギュラー刃長で4枚刃超硬フラットエンドミルを使用した. 検証実験の加工条件は軸方向切込み6mmとして工具径 D を6mm, 径方向切込み ae は35% (1.4mm), 切削速度 V は40m/min, 1刃当たりの送り量は0.03mmとした. なお, 検証実験は研究期間の都合であらかじめ録音した切削音を動画で視聴する方式とした. アンケートにて有効な回答があった6名の評価結果を図6に示す.

7. 結論

本研究課題では騒音現場で常に鳴り響いているエンドミルによる切削加工音に注目して, 作業者の心理的負担となっている切削加工音に倍音 (ハーモニクス) を合成させ耳に心地よい音色にしようと試みた. 以下に得られた成果を示す.

- (1) 切削音に対する感情的イメージをSD法で分析した結果, 経験年数が異なる3つのグループすべてで切削状態が安定している場合 (TEST2,4) でも, 切削音にネガティブなイメージがある. また経験年数が長いと音への敏感さが薄れる傾向が見られた.
- (2) 人は倍音が多く均等で整数倍であれば心地よい音に聞こえやすいことから, 切削音に2倍音と3倍音に対応する周波数の成分を追加して, 心地よい切削音「ハーモニクス合成音」を作成した.
- (3) 検証実験の結果から6名中4名がハーモニクス合成音を心地よい音色であると評価した. 今後の課題として操作盤付近でのハーモニクス合成音の実地検証と複数の音を作成して調査することである.

収集したデータはこの調査のみに使用します. なお, アンケートの回答は統計的に処理され, 特定の個人が識別できる情報として, 公表されることはありません.

参考文献

- [1] 厚生労働省. 騒音障害防止のためのガイドライン. 令和5年4月, <https://www.mhlw.go.jp/content/001089239.pdf>
- [2] 厚生労働省. 騒音障害防止のためのガイドライン. 平成4年10月, <https://www.mhlw.go.jp/content/000679171.pdf>
- [3] 厚生労働省. (2021年12月17日). 人材確保対策. <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000053276.html>

謝辞

本研究は一般財団法人一樹工業技術奨励会の2021年度研究助成金とJSPS科研費23H05181の助成を受けて実施されました. ご支援頂き深く感謝申し上げます.