



ホーニング音の研究*

— SD 法による音色評価 —

上田 隆 司** 佐久間 邦 郎***

Investigation on Honing Sound
— Evaluation of Timbre with Semantic Differential —

Takashi UEDA and Kunio SAKUMA

In order to improve the sound environment in workshop, the quality of machining noise which is produced in honing operation is investigated using Semantic Differential. The noises produced in milling and forging operations are used to compare with the honing sound. The main results obtained are follows. The coordinate of semantic space is derived using factor analysis: its first factor, "powerful" factor; and second factor, "metallic" factor. But it is not easy to find an appropriate index for third factor of "pleasant" in these machining sounds. These three sounds have high loadings on "powerful" factor, and the impression of "powerful" factor increases in the order of honing, forging and milling. Forging and honing sounds have high loadings on "metallic" factor, but the milling sound has low loadings on it. As the sound pressure increases, the impression of "powerful" and "metallic" factors becomes stronger.

Key words: honing sound, timbre, Semantic Differential, sound pressure, machining noise, forging, milling

1. 緒 言

機械加工音は加工に関する様々な情報を与える反面、過度の音は作業者および騒音環境下にある人に心理的・生理的な悪影響を与えるといわれている。したがって、できる限り機械加工音を低減させることが望ましいが、技術的にむずかしい場合や、生産性の面から不可能な場合があり、このようなとき、どのような騒音ならば許されるかについて考察してみることも必要である。

ホーニングでは、加工中にこの加工法特有の甲高い加工音を発生することが知られており、著者らは先にこの加工音の特性や音圧について加工状態との関連性について調べている¹⁾。それによればホーニング音は、1200 Hz 付近に最大ピークをもち、旋削や研削などの加工音に比べ格段に音圧が高く、しかも砥石の作業状態と密接な関連があり、加工状態を把握する監視信号として用いることができるとの結果を得ている。ところが、音圧を作業環境として適正な 85 dB 以下に抑えて加工しようとする、砥石圧力を落とす以外に有力な手段が無く、生産性は極端に低下してしまう。このため、現在のところ 100 dB 近い騒音環境下で作業するのが一般的となっている。したがって、これまでのようにホーニング音を騒音レベルや周波数成分から調べるだけでなく、人に与える心理的影響の面から検討してみることも必要と思われる。

一般に、音の属性には、「高さ」、「大きさ」、「音色」の3つがあると言われており、このうち高さや大きさについては物理的定義がはっきりしているが、音色については心理的な面も作用するため、その定義がむずかしい²⁾。JIS によれば音色は「聴覚上の音の性質の1つで、2音の大きさおよび高さがともに等しくてもその2音が異なった感じを与えるとき、その相違

に対応する性質」と定義されているが、難波はさらに一般性をもたせ、「1) 音源が何であるか識別するための手がかりとなる特性、2) 音を聞いた主体が音から受ける印象の多次元的属性の総称で感情的色彩を帯びる。この音色的印象は種々の音色表現語で記述しうる」と音色を定義している。すなわち、音色は種々の音色的表現によって記述することができ、その方法について様々な研究結果が報告されている³⁾。

そこで本研究では、ホーニング音が人の感性にどのように感じられるか、すなわちその音色について調べてみた。具体的には、ホーニング音のほか、騒音の激しい鍛造や代表的な加工法であるフライスの加工音を取り上げ、これらの加工音が人にどのように感じられるかについて SD 法による実験を行い、どのような音色空間に記述できるかについて検討してみた。

2. 加工音の測定

2.1 録 音

加工音には、ホーニングのほかフライスおよび冷間鍛造の加工中の音を測定する。加工条件を表 1~3 に示す。JIS 8713 に基づき、加工点より 1 m、床より 1.2 m の位置に 1/2 インチコンデンサマイクロホンを設置し、精密騒音計 (JEIC TYPE 1030) を介して DAT レコーダ (TEAC RD 101 T) に録音した。測定信号の解析には FFT アナライザ (小野測器 CF 350) を用いた。

2.2 加工音の特性

加工音の音圧波形を図 1 に示す。横軸は時間である。(a) はホーニングの加工音であるが、断続的に高くなっており、時間的に一樣な音ではないことがわかる。棒状の砥石が回転しながら往復運動しており、砥石と加工材料との接触状態が時々刻々変化するためである。(b) はフライス加工の場合であるが、ほぼ一樣な加工音を生じている。(c) は鍛造の加工音であるが、ハンマが加工材料を打撃する瞬間に衝撃音を生じるため、断続的に音圧が大きく変動している。

* 原稿受付 平成 8 年 12 月 16 日
** 正 会 員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)
*** 学生会員 金沢大学大学院

Table 1 Honing condition

Honing machine	CHISHIMA Industry CVA-500 S
Stick	WA 150 A(S)
Shape, number	10×10×100 mm, 4 sticks
Honing speed	30 m/min
Crosshatch angle	30°
Stick pressure	530 kPa
Workpiece	S 45 C pipe (inside diameter: 60 mm)
SPL	92.4 dB

Table 2 Milling condition

Milling machine	OSAKA KOKI MH-2 P
Cutter	High speed cutter
Traverse speed	65 mm/min
Chip load	2 mm
Revolution	300 rpm
Workpiece	S 45 C
SPL	82.4 dB

Table 3 Forging condition

Forging machine	NAZEL
Forging type	Air hammer
Condition	Cold
Workpiece	SS 41
SPL	105.2 dB

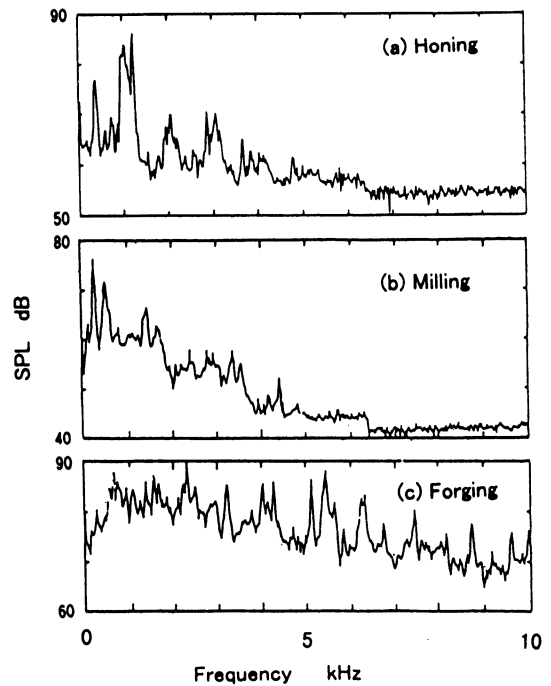


Fig. 2 Frequency spectrum of each machining sound

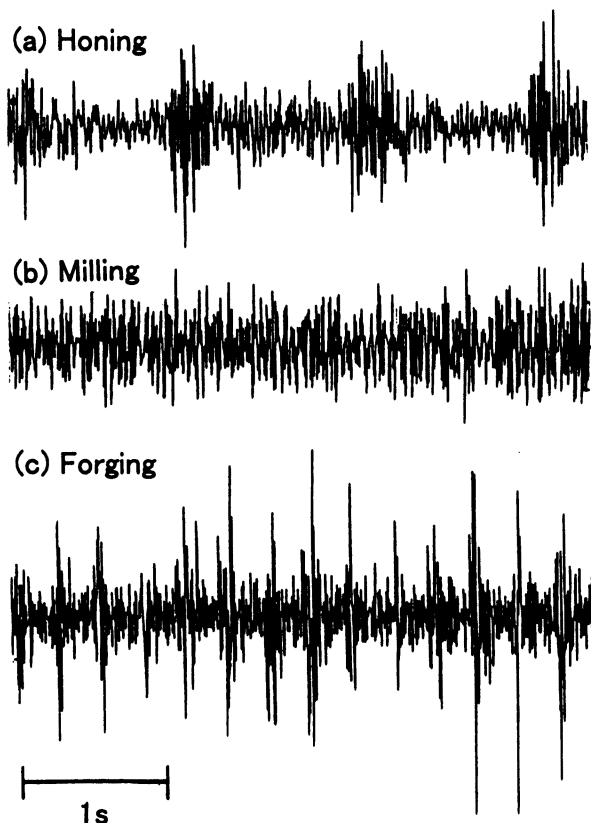


Fig. 1 Wave form of each machining sound

これらの加工音を周波数分析した結果が図2である。音圧が時間的に大きく変動していることから、FFTの加算機能を用いて約10秒間の音を分析している。(a)のホーニング音は1200 Hz 近辺に最大ピークをもち、その高調波が小さなピーク

クを作っている。このとき、ホーニング音の音圧は92.4 dBであった。(b)のフライス加工は最大ピークが400 Hz 近辺にあるが、これは駆動系によるものである。このときの音圧は82.4 dBであり、かなり低い。(c)の鍛造は1000~2000 Hz の間の音圧が高く、これ以上の高周波にも多数のピークが現れており、高周波成分の多い音である。音圧は105.2 dBであり、3つの加工法の中でもっとも騒音の激しい加工法であることがわかる。

3. SD法の適用

機械加工音の“感じ方(イメージ)”すなわち音色の調査にSD法(Semantic Differential)を用いた⁴⁾。SD法はさまざまな事象に対する主観的感覚を評価する心理学的手法である。実際には“意味空間”と呼ばれる座標を作成し、その座標上にそれらの事象に対する感じ方をプロットすることによって評価を行う。SD法の施行においては、図3に示すように大きく3段階に分けることができる。

前段階では図4に示すような実験で用いる評定用紙の作成を目的としている。コンセプト(SD法において調査対象となるもの)のイメージを構成する次元の析出であり、一般に数百の形容詞対尺度について評定を行わなければならない。しかし、これは被験者を多数用意しなければならないなどたいへんな作業である。ここでは難波ら²⁾が提案して、交通騒音や生活騒音の評価に使われている12対の形容詞対を用いることにする。

第1段階では、被験者にコンセプトを提示し(加工音を聞かせ)評定用紙に記入させる。その結果から各形容詞対尺度間の相関を求めることによって因子分析を行い、共通因子を析出する。すなわち、コンセプトをよく説明できる形容詞対尺度を選択することになり、この共通因子が“意味空間”の各座標軸となる。

第2段階では、求めた座標軸に“意味を持つ量”を持たせ、意味空間を完成させる。この意味空間をもとにコンセプト(ここでは加工音)の評価を行う。

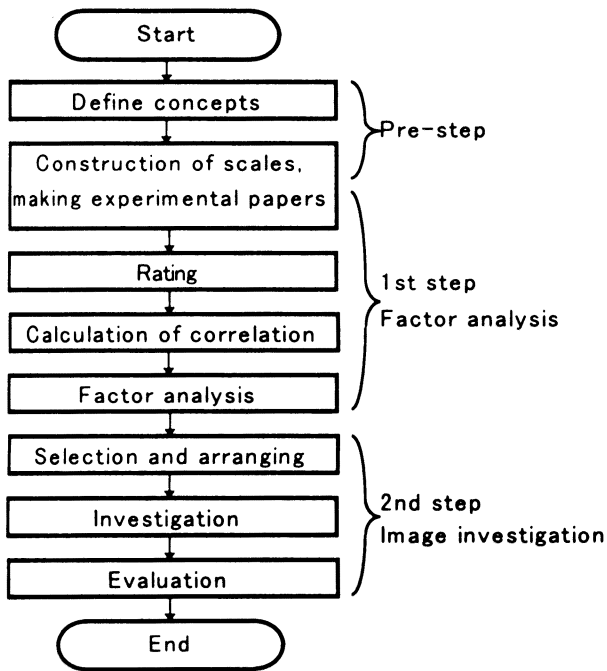


Fig. 3 Flow chart of semantic differential

Experimental paper		
flat	1 2 3 4 5 6 7	rumbling
smooth	1 2 3 4 5 6 7	harsh
strong	1 2 3 4 5 6 7	weak
calm	1 2 3 4 5 6 7	shrill
gentle	1 2 3 4 5 6 7	hard
harmonious	1 2 3 4 5 6 7	discordant
clear	1 2 3 4 5 6 7	thick
powerful	1 2 3 4 5 6 7	unsatisfactory
distinct	1 2 3 4 5 6 7	dull
deep	1 2 3 4 5 6 7	metallic
pleasant	1 2 3 4 5 6 7	unpleasant

Fig. 4 Experimental paper for semantic differential

4. 加工音の音色

4.1 実験方法

加工音の音色をSD法で調べた。図5に実験装置を示す。録音されている加工音をDATレコーダによって再生し、ヘッドホンを通じて被験者に聞かせる。このとき、ヘッドホンからの出力音圧はヘッドホン用アダプタによって任意に設定できる。実験は被験者に加工音を聞かせ、調査用紙に被験者が感じた結果を記入させた。調査用紙は図4に示すように、12種類の形容詞対尺度を用いている。被験者は加工研究室に属し、通常の聴覚を有する21~27歳の成年男子である。

4.2 校正実験

ヘッドホンは据置型スピーカと異なり、被験者が空間的に移

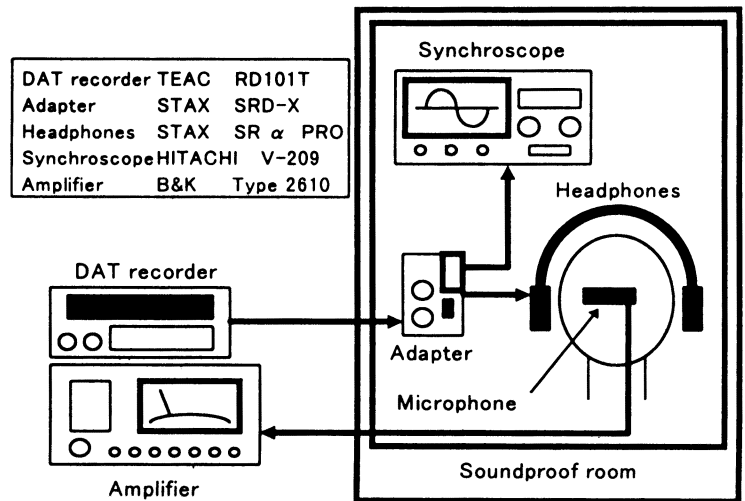


Fig. 5 Experimental equipment

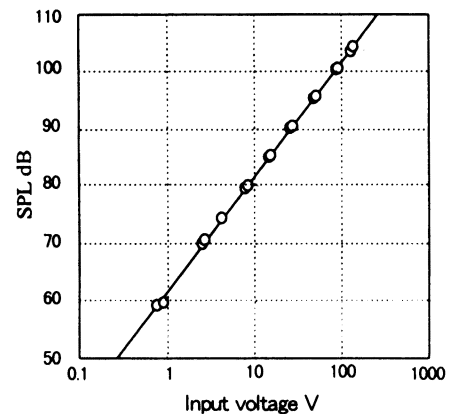


Fig. 6 Calibration for headphones

動しても聞こえる音圧は変化せず、また、不必要な外部の音がある程度遮断できる。これは被験者に一定音圧の音を聞かせるために本研究に適している。しかし、装着したヘッドホンから出力される音の音圧を測定することはむずかしい。このため、所定の音圧を持った音を出力させる方法を確立しておく必要がある。ここでは、ヘッドホンにかかる電圧と、その時ヘッドホンから出力される音圧の関係を調べておき、電圧の調整によって所定の音圧をヘッドホンから出力することにする。

校正実験に使用した実験装置を図5に示す。精密騒音計からの校正信号(1000 Hzの正弦波)をDATレコーダにいったん録音し、その再生信号をヘッドホン用のアダプタ(STAX SRD-X)に入力する。アダプタで任意の倍率に増幅された電気信号はヘッドホン(STAX SR α PRO)へ送られ、音に再生される。このとき、アダプタからの出力電圧を電圧計でモニターする。ヘッドホンは、耳の位置にマイクロホンが埋め込まれているマネキンの頭部に装着されており、このマイクロホンによってヘッドホンからの音を測定する。マイクロホンで検出された信号はアンプ(B&K Type 2610)に送られ、音圧を測定する。

電圧による測定電圧とアンプの測定音圧の関係を図6に示す。片対数グラフ上で両者の間には直線関係があり、このグラフを用いることにより、ヘッドホンへの入力電圧を測定すれば、ヘッドホンからの出力音圧を知ることができる。ヘッドホンの仕様によれば、100 V(rms)/1000 Hzの入力に対して出力

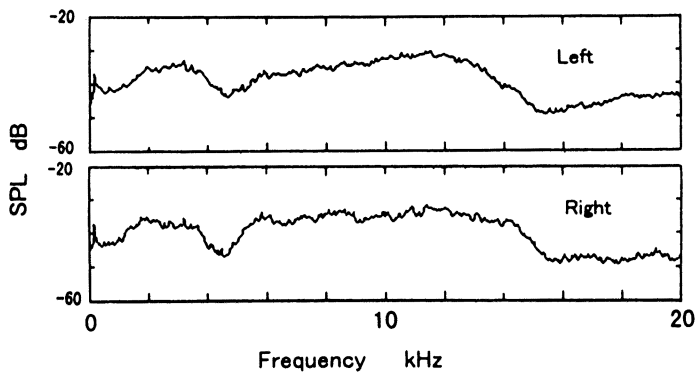


Fig. 7 Frequency specificity of headphones

が101 dBであることから、図6の校正曲線の101.7 dBはよい一致をみているといえる。

図7はヘッドホンの周波数特性を調べた結果である。ジェネレータで発生させたホワイトノイズをヘッドホンで再生し、その音を周波数分析した結果である。少し波打ってはいるが、ほぼフラットな特性を持っているとみなせる。また、左右で大きな違いはなく、同じ特性を持っていることがわかる。

4.3 実験結果

4.3.1 継続時間と音圧

ここでは加工音としてホーニング音をとりあげ、コンセプトとして音の継続時間と音圧を変えた合計16種類の加工音を取り上げることにした。被験者に加工音を聞かせ図4の調査用紙に記入してもらった。このとき、調査用紙は形容詞対尺度の順序をランダムに並べ変えたものを使用し、加工音の順序もランダムに与えることによって、前回までに行った調査の影響をできるだけ小さくしている。

形容詞対尺度に対する評定結果の一例が図8である。(a)は被験者に音圧96 dBの加工音を5秒、10秒、15秒、20秒間聞かせたときの調査結果であり、被験者15名の平均値をプロットしたものである。音色は時間的要因の影響が重要であるといわれているが、継続時間によって音の感じ方に大きな違いがみとめられず、継続時間をコンセプトに選ぶ必要のないことがわかる。(b)は音圧を76 dB、86 dB、96 dB、106 dBと変化した加工音を15秒間被験者に聞かせたときの調査結果である。これも全員の平均値をプロットしている。結果より、ホーニング音

は「とげとげしく」、「力強く」、「甲高く」、「騒々しく」、「硬く」、「迫力のある」、「はっきりした」、「金属性の」といった形容詞で表され、音圧が高くなるにつれ、この感じ方の傾向が強くなることがわかる。

4.3.2 音色の比較

ホーニング音、鍛造加工音、フライス加工音の3種類の加工音について、76 dB、86 dB、96 dB、106 dBに音圧を変化させた合計12種類の加工音について調査を行った。被験者20名に加工音を15秒間聞かせ、音から受ける感じを図4の調査用紙に記入してもらった。なお、先の実験結果より継続時間の影響は小さいことから、ここでは一定としている。

形容詞対尺度に対する評定結果が図9である。(a)がホーニング音、(b)がフライス加工音、(c)が鍛造加工音の調査結果である。(a)のホーニングと(c)の鍛造を比較すると、両者の間に大きな差は無いが、音圧が低い場合に少し差が現れており、ホーニング音の方が不快に感じられている。これに対し、(b)のフライス加工音では少し傾向が異なり、音圧が高くなっても、「甲高い音」とは感じられないことがわかる。これは周波数分析結果において高周波成分の音圧が低いことによるものと考えられる。音圧が高くなればいずれの音もその感じ方が強くなっている。

この3種類の加工音について因子分析した結果を表4に示す。一般に、音色表現に関して、音の美しさ・快さと関係のある美的因子、音の豊かさ・迫力感と関係のある迫力因子、音の甲高さの印象と関係のある金属性因子の3つの因子で、音色空間がほぼ定義されることが確認されている²⁾。そこで、表4でも第3因子の析出まで行うことにした。

第1因子に最も高い負荷量をもつ形容詞対尺度は、因子負荷量の高い順から、「力強い—弱々しい」、「迫力のある—物足りない」、「柔らかい—硬い」、「快い—不快な」、「騒々しい—物静かな」、「溶け合った—ばらばらな」の6組である。同様に第2因子については、「深みのある—金属性の」、「落ちついた—甲高い」、「丸みのある—とげとげしい」、「はっきりした—ぼんやりした」、「澄んだ—濁った」、「滑らかな—ごろごろした」の6組である。第3因子には、高い負荷量をもつ形容詞対尺度は存在しなかった。この結果から、第1因子を代表する形容詞対尺度に「力強い—弱々しい」、「迫力のある—物足りない」、「柔らかい—硬い」の3組を選び、第1因子を「迫力」と決定した。

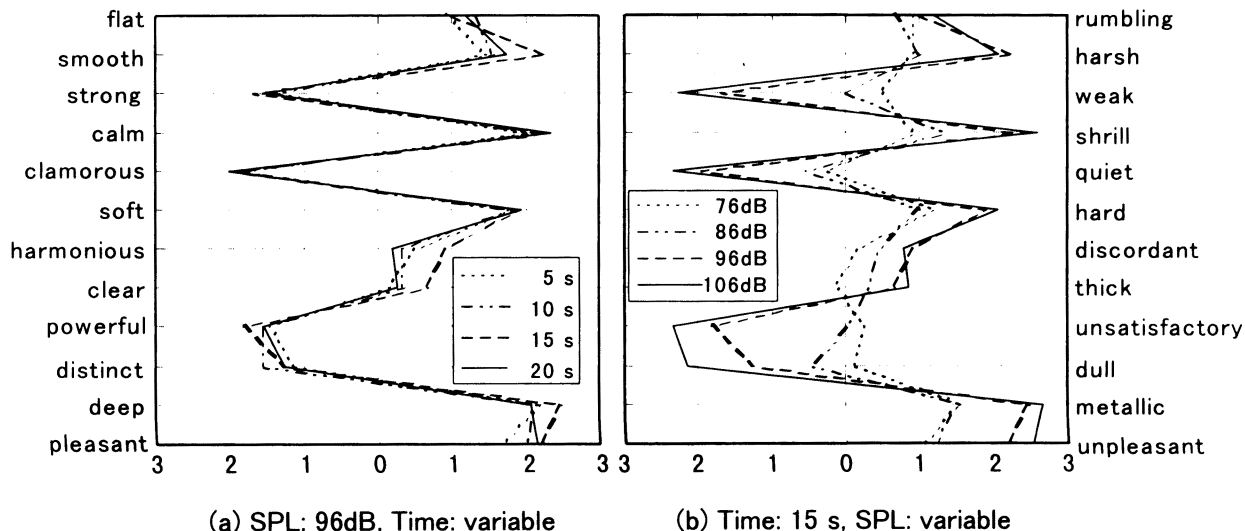


Fig. 8 Comparison of semantic profile

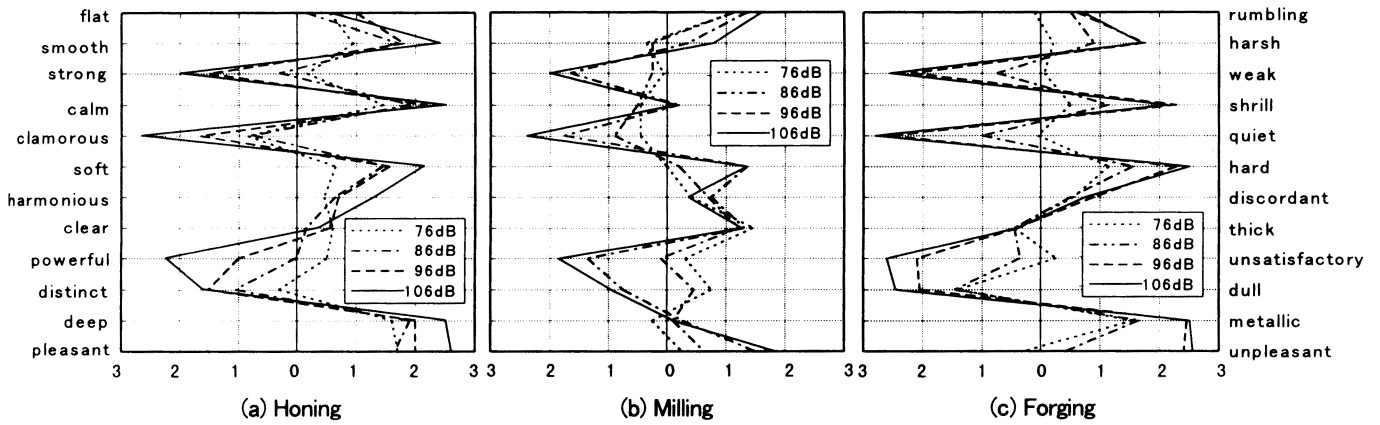


Fig. 9 Comparison of semantic profile

Table 4 Result of factor analysis for three machining sounds

Adjective scales	Load factor			Commonalty
	1st factor	2nd factor	3rd factor	
	Powerful	Metallic	—	
flat - rumbling	0.353	-0.256	0.200	0.291
smooth - harsh	0.622	0.651	0.058	0.813
strong - weak	-0.812	-0.145	0.341	0.796
calm - shrill	0.658	0.719	0.122	0.965
clamorous - quiet	-0.754	-0.146	0.144	0.611
soft - hard	0.775	0.472	-0.005	0.824
harmonious - discordant	0.481	0.088	0.225	0.289
clear - thick	0.129	-0.564	0.332	0.438
powerful - unsatisfactory	-0.805	-0.169	0.360	0.806
distinct - dull	-0.548	-0.603	0.280	0.743
deep - metallic	0.588	0.773	0.105	0.956
pleasant - unpleasant	0.761	0.233	0.098	0.643
Contribution	4.894	2.702	0.578	8.174
Percentage of contribution %	59.879	33.052	7.069	—

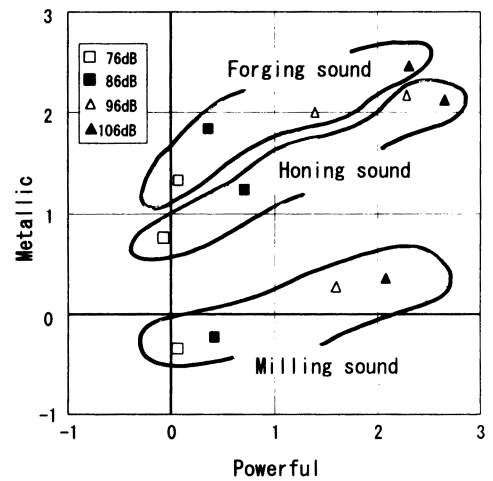


Fig. 10 Semantic space

また、第2因子を代表とする形容詞対に、「深みのある—金属性の」、「落ちついた—甲高い」、「丸みのある—とげとげしい」の3組を選択し、第2因子を「金属性」と決定した。

これらの結果より作成した加工音に関する音色空間を図10に示す。横軸が第1因子の迫力、縦軸が第2因子の金属性であり、美的因子を表す座標軸はこの場合必要ない。それぞれの因子に属する3つの形容詞対に対する表4の記入結果を用いて、それぞれの加工音を音色空間上にプロットしている。

この結果より、これら3つの加工音の音色は次のようになる。加工音には美しいと感じる美的因子は無い。金属性は鍛造が最も強く、ホーニング音もこれに近い甲高さがあるが、フライスの加工音にはほとんど無い。迫力はいずれの加工音もあり、ホーニング音が最も強く、続いて鍛造、フライスの順である。

また、音圧が高くなると迫力・金属性は増すが、ホーニング音では86 dB から96 dB において急激に増大しているのに対し、鍛造ではほぼ音圧に比例している。

次報ではこのような音色をもつ加工音がどのような心理的重圧を与えるかを検討する。

5. 結 言

ホーニング音のほか、鍛造やフライスの加工音をとり上げ、SD法を適用することによりこれらの加工音の音色について調

べてみた。得られた主な結果は次の通りである。

- (1) 加工音に関する音色空間は第1因子が迫力、第2因子が金属性であるが、美的因子は第3因子になりえない。
- (2) 金属性は鍛造が最も強く、ホーニング音もこれに近い甲高さがあるが、フライスの加工音にはほとんど無い。
- (3) 迫力はいずれの加工音もあり、ホーニング音が最も強く、続いて鍛造、フライスの順である。
- (4) 音圧が高くなると迫力・金属性は増すが、その傾向はホーニング音と鍛造加工音では異なる。

おわりに、お世話になりました、大阪大学名誉教授(現、宝塚造形芸術大学教授)難波精一郎博士、大阪大学教授桑野園子博士に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 上田隆司, 小沢功敬, 山本 明: ホーニング音の研究(音圧と加工状態の関連性), 精密機械, 50, 10 (1984) 1640.
- 2) 難波精一郎: 音色の測定・評価法とその適用例, 応用技術出版, (1993).
- 3) 例えば, 難波精一郎: 音の嗜好(個人差と文化による差), 日本音響学会誌, 46, 9 (1990) 776. 桑野園子: 騒音評価の基礎, 日本機械学会講習会, No. 920-62 (1992) 1.
- 4) 例えば, 岩下豊彦: SD法によるイメージの測定, 川島書店, (1994) 43.