

# ホーニング音の研究\*

—ニューラルネットワークによる監視システムの構築—

佐久間 邦郎\*\* 岡島 健 —\*\*\* 上田 隆 司†

Investigation on Honing Sound

- Application of Neural Network to Construction of Monitoring System -

Kunio SAKUMA, Keniti OKAZIMA and Takashi UEDA

The machining noise produced in honing operation is honing sound. This study attempts to investigate experimentally the relation between the honing sound and the finishing performances of stones and to construct the neural network system to discriminate the finishing conditions. The main results obtained are as follows. When the stone pressure  $P_n$  is larger than the critical pressure  $P_c$ , the stone is on the condition of self-dressing and keeps the superior cutting ability. Then the honing sound with high sound pressure level is produced. The sound pressure becomes higher under the severer honing conditions. The honing conditions are grouped into three classes based on the magnitude of stone pressure; the low pressure condition ( $P_n$  is lower than  $P_c$ ), the normal pressure condition ( $P_n$  is larger than  $P_c$ ) and the severe pressure condition ( $P_n$  is much higher than  $P_c$ ). The neural network system is constructed to recognize the frequency spectrum of the honing sound produced under these three conditions. The effects of cell number of hidden layer and of learning rate on prediction results are investigated. It is experimentally proved that the proposed neural network system has a high discrimination rate and the honing sound is applicable as a signal to monitor the finishing conditions of stones.

**Key words:** honing, honing sound, machining noise, neural network, sound pressure level, frequency spectrum, critical stone pressure, finishing performance

## 1. 緒 言

工作機械において加工中に発生する加工音は、作業環境の面からできる限り低減させるべき騒音であり、その抑制が望まれる。しかし、一方では、加工状態に関する有用な情報が含まれている。例えば、切削や研削加工では生産能率や加工精度を向上するための適応制御がなされているが、その加工状態の監視技術として加工音を応用する試みがなされている<sup>1)</sup>。

ホーニングでは、この加工法特有のかん高い加工音を発生することが知られており、著者らはこれまでこの加工音について、工学的な面から検討するとともに<sup>2)</sup>、SD法を用いて加工音が人にどのように感じられるか心理的な面からの検討も行ってきた<sup>3)</sup>。その結果によれば、ホーニング音は作業環境の面からは騒音であり、できる限り抑制する必要があるが、一方、砥石作業状態と密接な関連があり、適切な活用方法を考えれば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可能性がある。最近、生産性の向上を目的として、大きな取り代をホーニング加工だけで除去することが要求され、砥石の切削性の長時間持続が要求されてきている。したがって、砥石の切削状態を監視しながら常に切れ味を一定に保つ工夫が要求されており、ホーニング音により、砥石の加工状態を簡便に監視できるシステムが出来上がれば、その利用価値は大きい。

そこで本研究では、加工実験を行うことにより、ホーニング音発生への加工条件の影響、およびホーニング音と砥石の切削特性との関連性を検討することにより、ホーニング音の監視信号としての適用範囲を調べてみた。また、代表的な加工状態を

取り上げ、その時発生する加工音を教師信号としてニューラルネットワークを構築するとともに、構築したネットワークに様々な加工音を適用することによりその加工状態識別率を調べ、ホーニング音の監視信号としての適用範囲についても検討してみた。

## 2. 加工実験

### 2.1 実験方法

実験装置を図1に示す。ホーニング音は加工点より1m、床よ

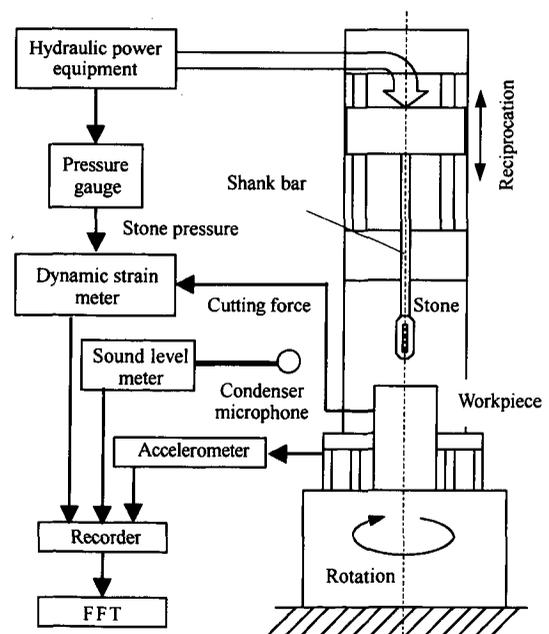


Fig.1 Experimental setup for honing

\* 原稿受付 平成12年7月17日

\*\* 学生会員 金沢大学大学院 (石川県金沢市小立野2-40-20)

\*\*\* (株)村田製作所 (滋賀県野洲郡野洲町)

† 正会員 金沢大学工学部

Table 1 Honing conditions

Honing speed	m/min	30 (10-50)
Crosshatch angle	°	30 (8-60)
Operating length	m	100
Over-run	mm	33
Workpiece		S45C
Length	mm	200
Internal diamiter	mm	60
External diamiter	mm	88
Honing stone		WA150J(S)

り1.2m離れた位置に設置した1/2インチコンデンサ型マイクロフォンで検出し、精密騒音計(JEIC TYPE1030)を介してDATレコーダ(TEACRD-100T)に録音した。音の解析にはFFTアナライザ(小野測器, CF-350)を用い、パーソナルコンピュータで処理した。砥石圧力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で測定し、力に換算した。加工抵抗は、加工材料支持台に取り付けたひずみゲージ式動力計で回転方向成分、往復運動方向成分を測定した。

表1に実験条件を示す。加工機械の性能が許す範囲で広い加工条件を設定しており、ホーニング速度、交差角を変化している。標準条件として、ホーニング速度30m/min, 交差角30°を採用している。加工材料には主にS45C相当のパイプ材を使用しており、材質を均質化するため約850°Cに1時間保持した後、炉冷焼きなまししている。このほか、加工音に影響すると考えられる加工材料の長さ、肉厚も変化させ、黄銅を用いる実験も行っている。

砥石には、主に硫黄処理したWA150J(S)砥石(形状:100×10×10mmの角柱状)を使用している。このほか、目的に合わせて、#320, #820のWA砥石, およびダイヤモンド砥石SD150/170(形状:100×3×3mm)も適宜使用した。

加工油は、極圧添加剤を加えたスピンドル油を6L/min供給した。

2.2 加工特性

一般の加工では砥石圧力を変えることにより、砥石の切削性を変化させている。図2(a)は砥石圧力 $P_n$ が仕上げ量 $\Delta D$ , 砥石損耗量 $\Delta S$ に及ぼす影響を調べた結果である。臨界砥石圧力 $P_c$ を境にして加工状態が大きく変化している。 $P_n$ が $P_c$ より大きい場合、砥石は脱落状態にあるため自生作用が活発となり、 $\Delta S$ は直線的に増加する。仕上げ量 $\Delta D$ も $P_n$ が大きくなるとともに直線的に増加している。また、仕上げ面粗さ $Ra$ は粗くなる。これに対し、砥石圧力 $P_n$ が臨界圧力 $P_c$ より小さい場合、砥石は大きく脱落せず小破砕によって損耗する程度で、次第に磨き状態へと移行するため $\Delta D$ や $\Delta S$ は小さくなり、小さな $Ra$ が得られる。

このとき、ホーニング音の音圧SPLを表す図2(b)を見ると、 $P_c$ 以下の圧力では音圧は80dB以下と小さいが、 $P_c$ に近づくに連れて急激に大きくなり、 $P_c$ 以上になると90dBを越える音圧になっている。

2.3 加工状態の分類

図2の結果より、砥石臨界圧力 $P_c$ が砥石圧力設定の際の大きな目安となることがわかった。そこで、この砥石臨界圧力を用いて加工状態の分類を行うことにする。

(1)  $P_n \gg P_c$  のとき

砥石の脱落状態は激しく、大きな切削量を得ることは

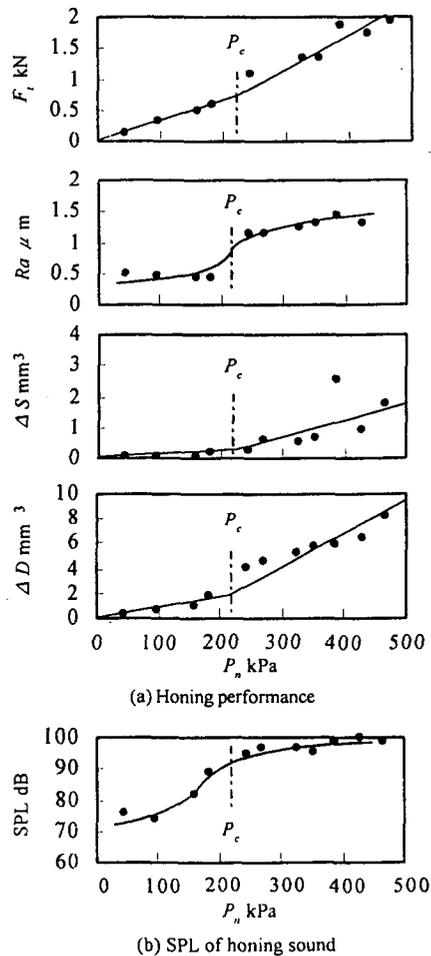


Fig.2 Influence of stone pressure

できるが、砥石損耗量が多すぎるため研削比に相当する仕上げ比が小さくなり、効率の悪い加工となってしまふ。加工抵抗 $F_t$ は大きな値で一定となり、加工面粗さも粗くなる。しかし、必ずしも避けるべき加工状態ではなく、大きい取り代が要求される場合、砥石の安定した切削性を要求する場合、などにおいては積極的にこの状態が望まれる。

(2)  $P_n > P_c$  のとき

砥石は脱落状態にあるが、十分その働きを発揮できる状態であり、過度の損耗とはならない。(1)の状態よりも砥石の切削性は低くなるが、仕上げ比が大きく、砥石は十分効率的に作用する。砥石の切れ味も長時間持続され、一般にこの状態の持続が歓迎される。

しかし、切りくずの排除が悪くなり砥石が目づまりを起こし始めると切れ味が低下し、仕上げ加工、磨き加工へと移行して、切削性が失われる恐れがある。

(3)  $P_n < P_c$  のとき

前加工粗さが残っている加工初期では砥石は切削性を持っているが、切れ味は急速に失われてゆき、短い加工時間で磨き状態となってしまふ。加工抵抗も小さい。

(4)  $P_n \approx P_c$  のとき

(2)と(3)の中間的な状態で、加工初期に置いては砥石は切削状態にあるが、加工材料の前加工粗さが小さくなっていくと、それに伴って砥石の自生作用が低下し切れ味は失われてゆく。すなわち、加工が進行するに従って、荒加工、仕上げ加工、磨き

加工と自動的に変化してゆく過程を示す。これに伴って、加工抵抗も低下していく<sup>2)</sup>。

2.4 ホーニング音

ホーニング音で加工状態を監視するシステムを構築するとき、そのシステムを正しく適用するためには音の発生する条件について調べておくことが必要である。砥石圧力 $P_n > P_c$ の条件を満足しても、音圧の高いホーニング音を常に発生するわけではない。砥石の種類、砥石の本数などによって音の発生が大きく影響を受ける。

そこで、ここでは、加工条件がホーニング音の発生にどのように影響するかを調べてみることにした。この検討によって、本研究で構築するネットワークの適用範囲を定めることができる。

2.4.1 発生機構

加工音の発生機構は複雑であり、そのすべてが明らかになったわけではないが、一般に工作機械(主にシャンクバー)－砥石－加工材料系における自励振動と考えることができる<sup>2)</sup>。周波数的には1200Hz付近に最大ピークをもつかん高い音で(後出の図4参照)、100dBを越える音圧を持ち、砥石の加工性能と深い関連がある<sup>2)</sup>。すなわち、砥石が切削状態にあるとき、砥石は自生作用が活発で、損耗しながら切削が進行していく。このとき砥石と加工面間での密着性が低下するため、砥石が振動して加工面をたたき、加工音を発生すると考えられる。一度発生すると加工面にびびりマークが残り、振動が持続する。このとき、図1に見るように、1m近い長さのシャンクバーの先に砥石が装着されている不安定な加工状態が振動の発生を容易にしている。したがって、その発生を止めるには、砥石と加工面との密着性を高めることが必要と考えられる。すなわち、砥石の損耗を止めれば音の発生を止めることはできるが、このとき、砥石の切削性も同時に失われてしまう。

2.4.2 砥石本数の影響

加工に使用する砥石の本数の影響を調べた結果が表2である。砥石圧力 $P_n$ を臨界圧力 $P_c$ 以上に設定しており、砥石が脱落加工を行っている状態を扱っている。砥石ヘッドにおける砥石の配置であるが、2本砥石では180° 間隔で、3本砥石では120° 間隔で、4本砥石ヘッドでは90° 間隔で、それぞれ砥石は配置されている。

表より、2本砥石では、音圧の高い加工音が発生しないのに対し、3本砥石、4本砥石では音圧の高い加工音を発生している。1つの試みとして、4本砥石ヘッドを用いて、相対する2本の砥石1組を、もう1組の砥石よりも損耗した状態で加工したときの結果が図3である。加工開始から20秒までは、2本砥石で加工しているためホーニング音を発生していない。しかし、砥石損耗が進み、4本砥石で加工するようになった40秒以降では100dB近い加工音を発生するようになっていく。30～40秒間は2本砥石から4本砥石へ移る過渡期である。

砥石損耗の極めて少ないダイヤモンド砥石では、安定した加工状態が得られることから、音圧の高い加工音の発生を防ぐことが期待できる。表2にダイヤモンド砥石を使って加工した結果を示す。2本ヘッド、4本ヘッドでは音圧の高い加工音は発生していないが、予測に反して3本砥石ヘッドでは音圧の高い加工音が発生している。

音圧の高い加工音の発生には砥石本数、および砥石と加工面の密着性などが関係していると考えられるが、まだ推測の域を出ておらず、今後の研究課題である。

Table 2 Influence of stone number on honing sound

Stone used	Number of stone	SPL	Stone pressure
WA150J(S)	4	> 95dB	$P_n > P_c$
	3	> 95dB	$P_n > P_c$
	2	< 85dB	$P_n > P_c$
SD140/170	4	< 85dB	
	3	> 90dB	
	2	< 85dB	

$V=30\text{m/min}$ ,  $2\theta=30^\circ$ , S45C

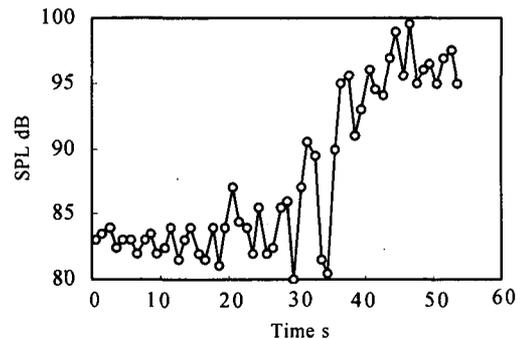


Fig.3 Influence of stone number on SPL

2.4.3 加工条件の影響

生産性を上げるため、加工速度を大きくする傾向にある。また、加工表面に形成されるクロスハッチパターンは大切な加工要素であり、加工面に求める機能によって交差角を変化させる。さらに、多品種少量生産の場合、長さ、内径、肉厚などの異なる材料を加工することになる。また、粗仕上げから仕上げ加工までを1台の加工機械で行おうとすると、粒度の粗い砥石から細かい砥石まで用いなければならない。時には、材質の異なる加工材料を加工する場合も出てくる。このような加工条件のすべての変化に対処できる制御機構を構築することはなかなか難しい。そこで、ここでは、加工速度を10～50m/min、交差角を8～60°、加工材料長さを150～400mm、肉厚を6～15mm、加工材料に炭素鋼S45Cのほか材質の柔らかい黄銅を用いて加工実験を行ってみた。その詳細な結果は省略するが、いずれの場合にも砥石臨界圧力 $P_c$ が存在し、 $P_c$ を境にして砥石の切削性は向上し、音圧に大きな差を生じる現象は同様に起こることが確認できた。また、ホーニング音のその周波数成分に大きな差を生じることはなかったことから、構築する監視システムの幅広い適用の可能性があることがわかる。

一方、砥石粒度を#150、#230、#820の3種類に変化させた場合にも砥石臨界圧力 $P_c$ は存在したが、 $P_c$ の値は変化した。一般に、砥石粒度が大きくなるほど砥石は柔らかく作用する傾向がある。そこで、本研究では、砥石粒度が異なる加工状態を同一ネットワークで判断することは除外することにした。

3. ニューラルネットワークの適用

加工実験の結果より、ホーニング音が幅広い加工条件の下で砥石の加工特性を表していることがわかった。そこでここでは、ニューラルネットワークを用いることにより、ホーニング音による加工状態識別システムの構築について検討することにする。

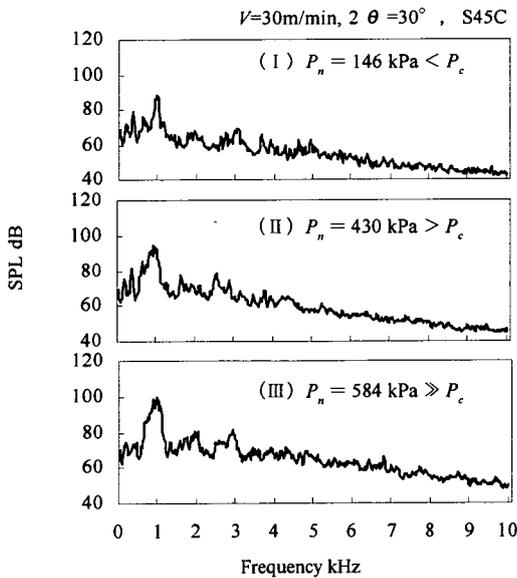


Fig.4 Honing sound spectrum (teaching signal)

Table 3 Network design

Architecture	Feed forward network
Layer number	3
Cell number in input layer	401
Cell number in output layer	3
Cell type	Static-analogue model
Transfer function	Log-sigmoid
Learning rule	Pure back propagation

### 3.1 ネットワークの設計

識別できる加工状態は多い方が好ましいが、初めての試みのため最も基本となる加工状態に対象を限定することにした。そこで、前節の検討より、砥石臨界圧力 $P_c$ を基準にした砥石圧力 $P_n$ の大きさにより、次の3つの加工状態を識別対象に設定した。

- (I) 軽負荷状態 (Light,  $P_n < P_c$ ),
- (II) 正常負荷状態 (Normal,  $P_n > P_c$ ),
- (III) 過負荷状態 (Heavy,  $P_n \gg P_c$ ),

これら3つの加工状態における典型的なホーニング音の周波数分析結果を図4に示す。ホーニング音のSPLのみを教師信号として構築したネットワークでも相当の識別率を得ることができるが、加工状態(II)と(III)の判定において識別率が低下してしまう。そこでここでは、ネットワークへの教師信号として、図4に示す周波数成分を用いることにした。0~10kHzの範囲の周波数成分を25Hzごとに401個に分割して、その各周波数の音圧レベルを表す401個の数値を用いた401行1列の列ベクトルで与えることにした。ネットワークからの出力は加工状態を表す信号で、フォーマットは各加工状態につき、

$$\text{Heavy} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Normal} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Light} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

で表される3行1列の列ベクトルとし、数字1の出力される位置により加工状態の識別を行った<sup>4)</sup>。ネットワークの構造は、入力・出力信号とも静的なため、フィードバック回路の無い階層型とし、各セルは伝達関数に指数シグモイド関数を持つ静的ア

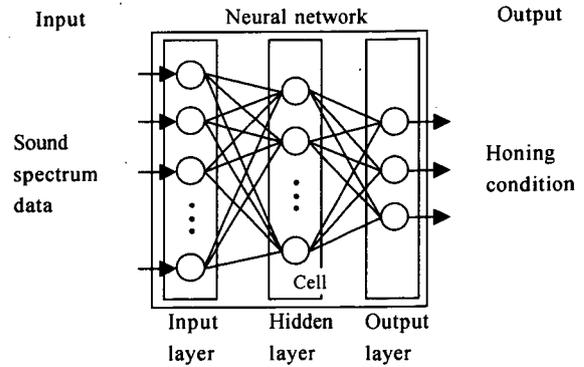


Fig.5 Structure of neural network

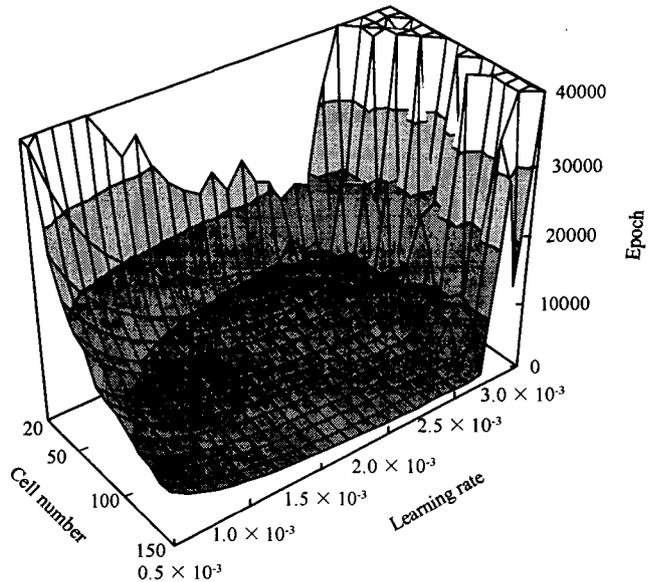


Fig.6 Result of learning experiment

ナログモデルとした。学習アルゴリズムには誤差逆伝播法を用いた。層数は、論理演算を実現させるために必要最小限の3層とした。中間層のセル数および学習比は、学習実験の結果により決定することにした<sup>5)</sup>。

以上により決定されたネットワークの構造を図5および表3に示す。

### 3.2 学習実験

学習実験により、設計したネットワークの学習状況を見極めるとともに、未定であった中間層セル数と学習比を決定する。ネットワークの学習目標値は平均自乗和誤差で0.1とし、学習時間の関係から40000エポック以内に0.1以下に到達しない場合には、そこで学習を打ち切った。学習比は $0.5 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ の範囲で $1.0 \times 10^{-4}$ ごとに、中間層セル数は20~150個の間で10個ごとに変化させて実験を行い、識別に最適な値を決定した。

図6に学習結果を示す。学習比、および中間層のセル数について、平均自乗和誤差が0.1に達するのに要したエポック数との関係を示している。

学習比が $2.5 \times 10^{-3}$ 以上では、いずれの中間層のセル数においてもエポック数が急激に大きくなって、学習が不安定になっている。これ以下の範囲においては、学習比、中間層セル数が小さくなると収束までに要するエポック数が徐々に増加する妥当

Table 4 Discrimination rate for sound when stone pressure is changed

Input		Output		
Output		Light	Normal	Heavy
Light	61	○		
	87	○		
	146	○		
	158	○		
	207	○		
Normal	232		○	
	356		○	
	430		○	
Heavy	495			○
	530			○
	584			○
	726			○
	1181			○

Table 5 Discrimination rate for sound when crosshatch angle is changed ( $P_n = 400$  kPa)

Input	Output
Crosshatch angle °	
8	Normal
15	Normal
30	Normal
45	Normal
60	Normal

Table 6 Discrimination rate for sound when honing speed is changed ( $P_n = 400$  kPa)

Input	Output
Honing speed m/min	
10	Normal
20	Normal
30	Normal
40	Normal
50	Normal

な傾向を示しており、ネットワークは安定して収束しているとみなすことができる。また、学習比は、安定的に収束する限りは値が大きい方が収束が早くなる。そこで、本研究では学習比を  $2.0 \times 10^3$  とした。

中間層のセル数の影響は小さく、いずれのセル数においても安定に収束している。しかし、セル数が40以下では40000エポックを超えて収束する場合もある。そこで、収束に要した時間の短い50で識別実験を行うことにした。

### 3.3 識別実験

#### 3.3.1 砥石圧力の影響

表4に示す13種類の砥石圧力でのホーニング音を入力し、識別させた。いずれの砥石圧力でも加工状態を正確に識別しており、構築したネットワークの識別能力がすぐれていることがわかる。したがって、加工音の周波数成分を用いて加工状態を識別する方法は有効であり、ホーニング音による加工状態の監視が十分可能であることがわかる。

#### 3.3.2 交差角、ホーニング速度の影響

交差角、ホーニング速度が識別率に与える影響を検討した。実験は、(II)の正常負荷状態において交差角または加工速度を変えて加工したときのホーニング音を入力し、どの状態として識別するかを調べた。

表5は、交差角のみを変えた条件でのホーニング音を入力し

たときの識別結果である。すべて(II)正常負荷と識別されており、交差角が変化しても識別は可能であると考えられる。

表6に異なる加工速度でのホーニング音を入力したときの識別結果を示す。このときもすべて正しく識別しており、加工状態の識別に与えるホーニング速度の影響は小さいものと考えられる。

以上の結果より、一度ネットワークを構築すれば広い範囲の加工条件に対して適用することができ、ホーニング音による加工状態の監視が十分可能であり、簡便な適応制御機構を備えたホーニング加工機の製作が期待できる。今後、識別できる加工状態の数を増やすこと、粒度の異なる砥石やダイヤモンド砥石への適用など監視範囲の拡大を検討していくことにしている。

## 4. 結 言

ホーニング音と砥石の切削特性との関連性を検討するとともに、代表的な加工状態での加工音を教師信号としてニューラルネットワークを構築し、その識別率を調べた。そしてホーニング音の監視信号としての妥当性について検討した。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 砥石臨界圧力  $P_c$  を境にして、砥石の加工状態は大きく変化し、 $P_c$  以上の圧力では砥石の自生作用が活発となり、砥石の切削性は向上する。これとともに、ホーニング音は音圧が高くなる。
- (2)  $P_n > P_c$  の加工状態であっても、砥石本数の違いによって、音圧の高いホーニング音を発生する場合と、発生しないときがある。
- (3) 加工状態を軽負荷状態 ( $P_n < P_c$ )、正常負荷状態 ( $P_n > P_c$ )、過負荷状態 ( $P_n \gg P_c$ ) の3つに識別するために構築したネットワークは、高い確率で加工状態を識別することができる。
- (4) ホーニング音を監視信号として用いることによりインプロセスで加工状態の把握が可能となり、安定した加工状態を維持することができるものと考えられる。
- (5) 構築したネットワークはホーニング速度、交差角などの加工条件が変化した状態にも適用することができる。

## 参 考 文 献

- 1) 樋口誠宏, 矢野章成: ファジィ理論の生産加工への応用(1), 機械の研究, 43, 6(1991)663.
- 2) 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.
- 3) 上田隆司, 佐久間邦郎: ホーニング音の研究-SD法による音色評価-, 精密工学会誌, 63, 7(1997)1039.
- 4) 例えば, 合原一幸: ニューロ・ファジィ・カオス, オーム社, (1994)54
- 5) 菊池豊彦: 入門ニューロコンピュータ, オーム社, (1989)39