

研削音の性質とドレッシング最適時期の 判定に関する研究

Study on a Property of Grinding Sound and a Judgement of Dressing timing of Grinding Wheel

(平成 15 年 9 月受理)

渡辺敏夫* (WATANABE Toshio)

佐藤記一** (SATO Norikazu)

Abstract

It is difficult to judge the dressing timing of grinding wheel by beginners. The timing is usually decided based on many years' experience. This research is to find the standard of the dressing timing. Grinding sound, grinding force and surface roughness of workpiece are measured in surface grinder and mutual relations of these signals are investigated. The material of workpiece is S50C, SK3 and SKD11. The dressing timing is discussed. The following points are made clear.

- (1) The sound pressure level of grinding sound depends on the material of workpiece and the dominant frequency is different in material.
- (2) There are no steady relations among grinding sound, grinding force and surface roughness of workpiece. Therefore, it is difficult to predict the grinding condition by grinding sound only.
- (3) The dressing timing is to be realized by neural network method if the results of detailed experiment is obtained.

1. 緒言

研削作業を行うと砥石に目つぶれや目づまりが起き切れ味が低下して良好な研削が出来なくなる。そのまま続けると材料表面が荒れ良好な表面を保つことが出来ない。そのために砥石の表面を削り落とすドレッシングを行うことになる。しかし、そのドレッシングを行う時期は作業者が工作物表面性状、研削時に出る火花、発生する音を総合して判断している。しかし、この時期の判定にはある程度の知識や経験が必要で初心者が判断するのは難しい。また、経験者でもそれが最適な時期であることを確認するには測定器を用いて調べることが必要になってくる。その最適な砥石寿命とする基準を設けることが重要になる。人の判断によらず一定の基準によって砥石寿命が判断できれば、研削加工の精度や経済性の向上に役立つものと思われる。

本研究では、平面研削盤を用いて材料の平面研削を行い、情報として研削音、研削抵抗、研削面粗さをモニターし研削状態を調べ、最適なドレッシング時期と

する基準を調査した。硬さの異なる 3 種類の焼き入れ鋼を用い平面研削を行った。研削音は特殊な装置を用いることなく手軽に測定が可能である。研削音によって研削状態が精度よく把握できれば、利用価値が高い。ここでは、研削音を詳しく調べ、研削音による最適なドレッシング時期を、ニューラルネットワークなどの方法を用いて可能かどうかの検討を行った。

2. 実験方法

2. 1 実験装置

横型平面研削盤（黒田精工 GS-CH）を用いて、Table 1 に示すように研削砥石で研削加工を行った。砥石の回転数は 2800rpm である。研削加工材料は Table 2 に示す 3 種類の焼き入れ鋼を、縦送り方向での 1 回のストロークで設定切り込み量を加工できるように砥石幅より小さくなるように、表に示す大きさに加工して研削を行った。従って、横送りをしないで研削作業を行った。

* 福島工業高等専門学校 機械工学科 (いわき市平上荒川字長尾 30)

** 平成 14 年度福島工業高等専門学校 機械工学科 卒業生 (現 茨城大学工学部 システム工学科 学生)

Table 1 Experimental Condition

| | |
|-------------------|--------------------|
| Grinding wheel | WA60I7V |
| Wheel speed | 206 × 19 × 50.8 mm |
| Depth of cut | 2800rpm |
| Table speed | 5 μm |
| Cutting condition | 6m/min |
| | dry cutting |

Table 2 Work piece

| Material | Vickers hardness (HV) |
|----------|-----------------------|
| S50C | 309.1 |
| SK3 | 549.2 |
| SKD11 | 709.4 |

Size 50 (L) × 40 (H) × 15 (W) mm

2. 2 研削実験

研削作業を始める前に、Table 3に示す条件で砥石表面に常に新しい砥粒が現れるようにドレッシングを行った。研削作業を行いながらFig. 1に示すように砥石のごく近くにおいたマイクロフォンによる音圧、ひずみゲージを取り付けた動力計で研削材料に働く材料の長手方向、材料表面に対して垂直方向、材料に対して横方向のそれぞれの研削抵抗、それに材料の研削面粗さを測定した。研削を始めて 100[pass]ごとに研削作業を中断して材料の研削面粗さを測定した。ここで、1[pass]とは工作物に上向き研削 (up grinding) と下向き研削 (down grinding) を1回ずつ行う工程である。上向き研削とは工作物の送り方向に対して砥石の回転方向が逆向きで、下向き研削は同じ向きの場合を言う。研削面粗さ以外の信号はデータレコーダに記録し、それを再生して信号の解析を行った。

Table 3 Dressing Condition

| | |
|---------------|--------------------------|
| Dressing tool | 1/2carat diamond dresser |
| Depth of cut | 4 μm |
| Table speed | 240mm/min |

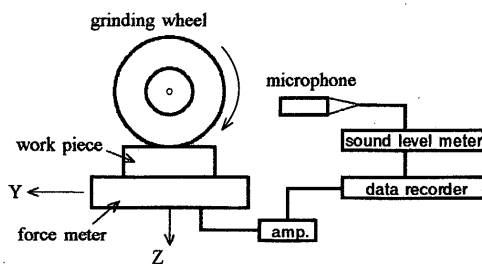


Fig.1 Experimental setup

3. 実験結果および考察

3. 1 研削音と研削パス数

Fig.2に3種類の材料を研削したときの研削音の音圧レベルと研削パス数の関係を示す。ここに示す音圧レベルは、所定のパス数付近の10[pass]程度の平均値を用いて表している。研削していないときの暗騒音は72dB程度であるので72dBに近い値のときは暗騒音を含んでいることが考えられる。

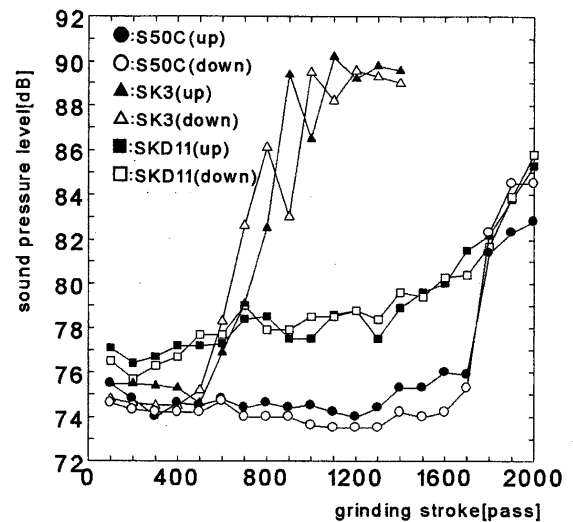


Fig.2 Sound pressure level of grinding sound versus grinding stroke.

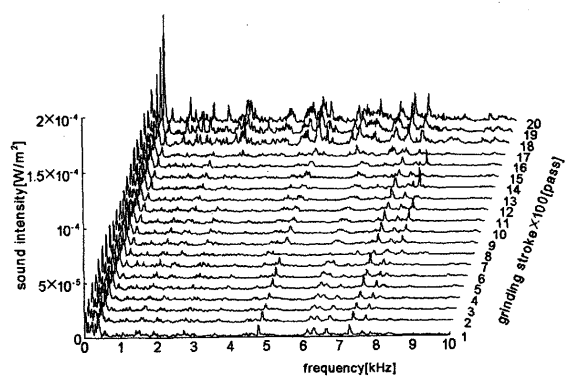
ここに示すように、研削パス数の増加と音圧レベルの変化は、材料の種類によってそれぞれ異なった特徴を示している。この中で、S50Cの音圧レベルは1700[pass]までは73~76dBの間でほぼ一定かわずかに減少している。その後、1700[pass]以降では音圧レベルが急激に増加し、2000[pass]付近では83~85dBに達する。SK3については、500[pass]付近までは74~76dBの間で低下傾向にあるが、500[pass]から1200[pass]までは音圧レベルが急激に増加し、1200[pass]以上では約89dBでほぼ一定になる。SKD11は他の2材料とは異なり、研削工程の全域にわたって徐々に増加している。1600[pass]付近以上では増加割合が大きくなる。これらのことから、3種類の材料に共通するのは、研削パス数が増加すると音圧レベルが急激に増加する点が存在することである。これは、研削が進むにつれて砥石の目づまりおよび目つぶれが進行するために、砥石と加工材料との接触面積が増加し、研削抵抗が増大する。そのために砥石への加振力が大きくなり、砥石が強く振動するため研削音が大きくなると考えら

れる。ドレッシング直後の研削では、砥石の切れ刃が切り立っているため、工作物とは点で接触し切削が行われる。そのため、砥石と工作物の研削面の接触面積は小さいので、接線方向の抵抗は小さい。また、この時の実際の研削深さは、切り込み送り $5 \mu\text{m}$ とほぼ等しいため、法線方向の抵抗も小さい。よって、研削音は軽快な音を立て加工材料の表面が削られ、その音圧レベルも小さい。しかし、研削パス数が進むと目つぶれが生じ接触面積は大きくなる。そして、切りくずによる砥石の目づまりが進行すると、砥石と工作物の研削面の接触面積は大きくなるので、接線方向の抵抗は増大する。また、砥石の切れ味が減退しているため、切り込み送り量よりも実際の研削量は小さく、法線方向の抵抗も増大する。よって、研削音は鈍い音を立て明らかに音質が変化し、音圧レベルが増大すると考えられる。これは後述する法線、接線研削抵抗の増加傾向からも明らかである。材料の硬さは Table 2 に示すように S50C<SK3<SKD11 の順に硬くなっている。400 [pass] までは硬いほど音圧レベルが高くなっているが、400 [pass] 以上で SK3 の音圧レベルが他の 2 材料に比べ早い時期に変化し、変化量も特に大きくなる。これは、SK3 の硬さが目詰まりや目つぶれが起きやすい硬さのためと思われる。

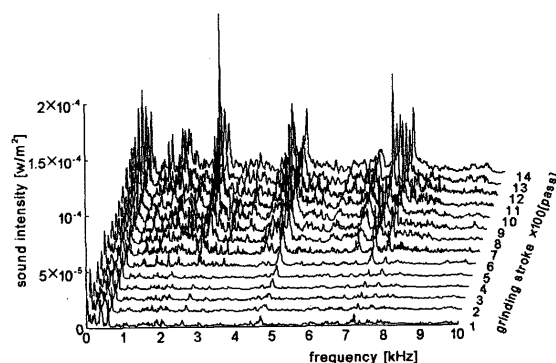
上向き研削と下向き研削の音圧レベルの違いが現れている。ここでは、切り込みを設定して行きの工程を上向き研削、帰りの工程を下向き研削として研削を行った。この結果によると、400 [pass] まではいずれの材料も上向き研削の音圧レベルが、下向き研削の音圧レベルを上回っている。S50C では、1800 [pass] までは下向き研削に比べて上向き研削の音圧レベルが大きい。これは工作物が柔らかいため上向き研削だけで研削量に達するので、下向き研削に比べて上向き研削の音圧レベルが大きいものと考えられる。しかし、音圧レベルが急激に増加する 1800 [pass] から、上向き研削と下向き研削の音圧レベルの大小は入れ替わる。これは砥石の切れ味が減退することにより、上向き研削だけでは切り込み量に達せず、下向き研削の音圧レベルが大きくなるものと考えられる。SK3 と SKD11 では、400 [pass] 以降は上向き研削と下向き研削の音圧レベルは交互に入れ替わる。これは硬い工作物では 400 [pass] 程度で砥石に目つぶれや目詰まりが生じて、いったんは帰りの工程である下向き研削の音が大きくなるが、さらに研削を進めると、砥石の目つぶれや目詰まりの程度により抵抗が小さくなりこともあり、下向き研削の音が弱くなるためと考えられる。

次に各工作物の研削音を FFT により周波数分析を

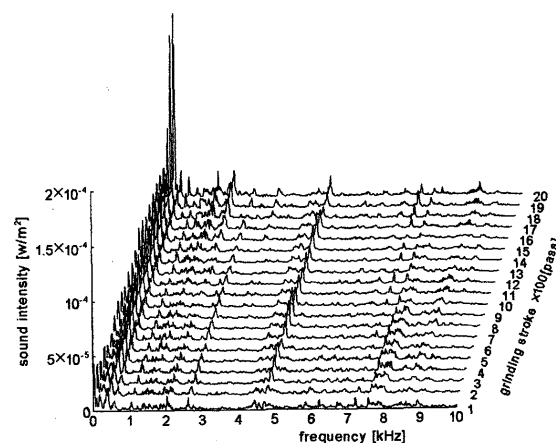
行った。Fig. 3に S50C、SK3、SKD11 の研削音の周波数ごとの音の強さのスペクトルと研削パス数の関係を示す。この研削音は上向き研削時のものを用いた。すべての工作物に共通のいくつかの周波数スペクトルが見られる。特に強く現れるのは、0.4kHz、2.7kHz、4.7kHz、7.2kHz、7.6kHz を中心とする $\pm 0.1\text{kHz}$ の帯域のスペクトルである。この周波数スペクトルは研削



(a) material of workpiece: S50C



(b) material of workpiece: SK3



(c) material of workpiece: SKD11

Fig.3 Spectrum of grinding sound in every 100 grinding stroke.

が進行しても帯域が変わることはない。そして、Fig.

2の音圧レベルのグラフと同様に、この周波数帯の音圧レベルがある一定の研削パス数で急激に増加している事から、音圧レベルが増加するのは、これらのスペクトルの強さが増加するためであることがわかる。

強く現れる周波数スペクトルの音圧レベルと研削パスとの関係を SKD11 の材料について Fig. 4 に示す。これらの周波数を細かく見ていくと、0.4kHz 帯のスペクトルは研削開始当初から 69 ~ 70dB と他のスペクトルに比べて大きく、この傾向はすべての工作物において共通である。SKD11 では、2.7kHz、4.7kHz、7.2kHz 帯域の音圧レベルには大きな変動はなく、7.6kHz 帯域の音圧レベルは減少の傾向にある。0.4kHz の音圧レベルだけが増加の傾向にあり、この周波数帯が全体の音圧レベル増加の原因である。強く表れる 1kHz 以上の高いスペクトルは砥石の固有振動数、1kHz 以下スペクトルは研削盤の駆動装置部分の振動数が考えられる。他の 2 種類の材料では音圧レベルが大きく増加するとき、0.4kHz 帯を除く高いスペクトルの増加が大きかった。これは、研削パス数が進むにつれて音圧レベルが大きく増加するのは、高いスペクトルのレベルが増加するためであり、ある研削パス数以上では SKD11 と S50C、SK3 とは明らかに音の発生メカニズムが異なっていることが考えられる。

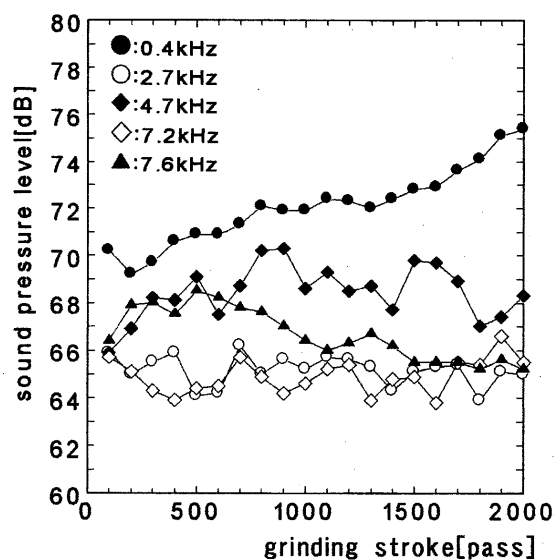


Fig.4 Several main spectrum(SKD11) versus grinding stroke.

3. 2 研削面粗さと研削パス数

Fig. 5 に各工作物の研削面粗さと研削パス数の関係を示す。研削面粗さの値は研削面の左側、中央、右側の 3 点を測定し平均したものである。今回測定した粗

さには算術平均粗さ [Ra] を用いた。

S50C の研削面粗さは研削開始後から徐々に粗くなり、1300[pass] 付近で粗さは 0.90 [$\mu\text{m Ra}$] で一定と

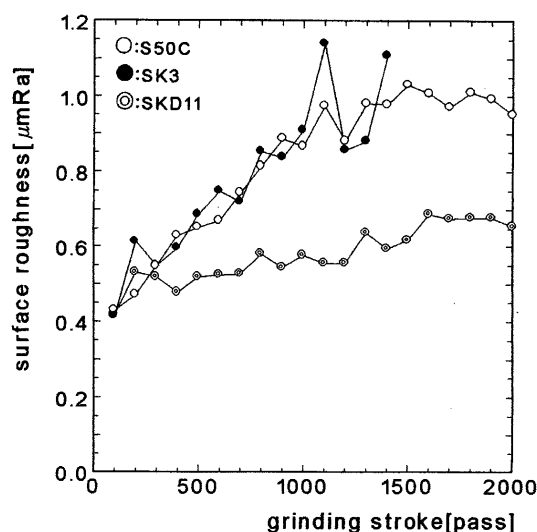


Fig.5 Surface roughness versus grinding stroke. The surface roughness is presented in arithmetic mean deviation of the roughness profile Ra.

なる。それ以上研削が進んでも粗さは増加しない。SK3 では S50C と同様に、研削開始直後から徐々に粗くなる。しかし、1200[pass]からは研削面粗さの値が大きく上下し、最大で 1.1 [$\mu\text{m Ra}$]となる。SKD11 の研削面粗さは、他の 2 材料に比べ緩やかな増加傾向を示す。そして、1500[pass]付近から約 0.75 [$\mu\text{m Ra}$]でほぼ一定の値になる。S50C と SK3 は研削パス数が進むにつれてほぼ同じ増加割合で研削面粗さが増加していく。SKD11 は研削パス数が進んでも極端に粗さは大きくならない。この事から研削面粗さは工作物の硬さが柔らかいものは粗くなりやすいことが分かる。また、研削音の音圧レベルと研削面粗さの増加傾向とは明らかに異なっており、研削面粗さと音圧レベルとは明確な関連性はないと考えることができる。

3. 3 研削抵抗と研削パス数

Fig. 6 と Fig. 7 に、接線方向と法線方向の研削抵抗と研削パス数との関係を示す。図から分かるように、同じ種類の工作物の法線方向と接線方向の研削抵抗の増加傾向はほぼ等しい。接線方向研削について、S50C では上向き研削時は 1700[pass]までは約 10N になるまで緩やかに増加し、その後 2000[pass]では約 13N まで増加する。下向き研削時では、1700[pass]までは約 3N になるまで上向き研削時と同様にわずかに増加

し、その後 2000[pass]では 8N まで達する。S50C は他の 2 種類の材料よりも上向き研削時の抵抗と下向き研削時の抵抗の差が大きい。SKD11 は S50C と抵抗値は違うが増加傾向は似ている。しかし、上向き研削の抵抗値と下向き研削の抵抗値の差が小さい。SK3 では研削抵抗の増加傾向は明らかに他の 2 種類の材料とは異なり、900 ~ 1100[pass]からは急激に研削抵抗が増加し、下向き研削の方の増加が著しい。

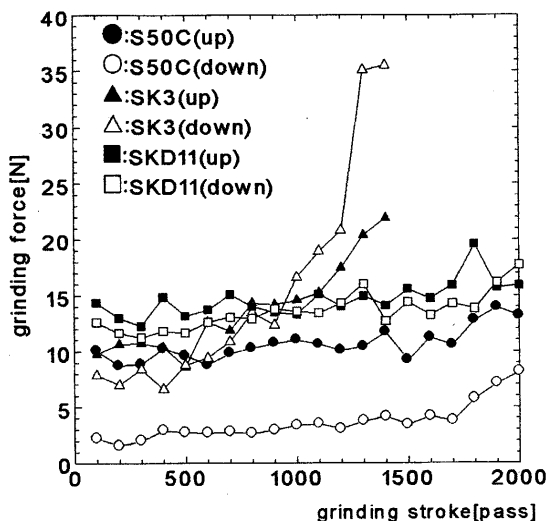


Fig.6 Tangential grinding force versus grinding stroke.

法線方向の研削抵抗について、Fig. 7に示すように、各材料とも増加の傾向は接線方向の研削抵抗とほぼ似ている。しかし、法線方向の研削抵抗の大きさが接線方向より 2 ~ 5 倍大きい。研削抵抗は一般に、研削作

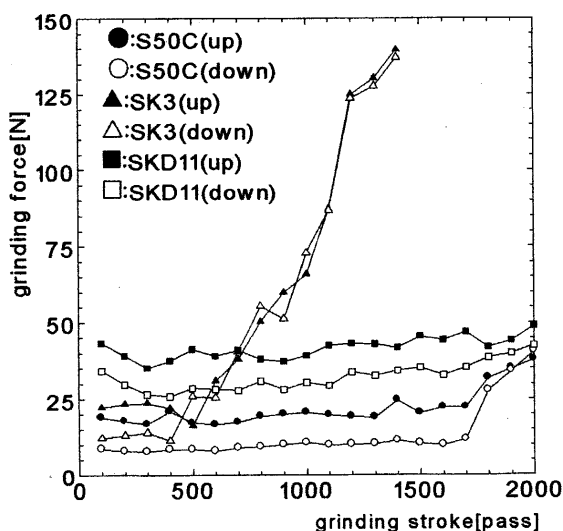


Fig.7 Normal grinding force versus grinding stroke.

業の消費動力に関わる接線研削抵抗を指すため、接線

研削抵抗は重要である。しかし、法線研削抵抗に比べ接線研削抵抗の抵抗値は小さい事から、研削音の発生要因は主に法線研削抵抗であることが分かる。そのため研削音の性質を解析する場合は、変動の小さい接線研削抵抗よりも法線研削抵抗を用いるほうがよいと思われる。

4. 砥石寿命の判定

これまで、研削音、研削面粗さ、研削抵抗をモニターしながら研削状態を観察してきた。これらの値を総合し関連性を考慮しながら砥石寿命を考える。そして、砥石寿命の判断基準を元に、ニューラルネットワークを用いた砥石寿命の判断システムの構築に対する展望及び留意点を述べる。

4. 1 ドレッシング最適時期

研削音の音圧レベルは、ある一定の研削パス数において急激に増加する点が存在し、それまで音圧レベルはほぼ一定である。しかし、研削面粗さは、研削開始当初から増加の傾向にある。このため、研削音の音圧レベルと研削面粗さには明確な関連性がないと思われる。研削面粗さによる砥石寿命の判定には、Salje の定義式が提案されている¹⁾。これは、研削当初の研削面粗さに対するそれ以降の研削時の研削面粗さの比が、ある一定の値となったときを砥石寿命を判定するもので、

$$\frac{H_T}{H_0} = 1.25, 1.5, 2.0 \quad (1)$$

H_T : 砥石寿命時の研削面粗さ

H_0 : 研削開始時の研削面粗さ

このような値のときを砥石寿命としている。

これに当てはめると

$$\text{S50C} - \frac{H_T}{H_0} = \frac{0.54}{0.43} = 1.25 \quad (300\text{Pass}) \quad (2)$$

$$\text{SK3} - \frac{H_T}{H_0} = \frac{0.57}{0.34} = 1.67 \quad (500\text{Pass}) \quad (3)$$

$$\text{SKD11} - \frac{H_T}{H_0} = \frac{0.54}{0.42} = 1.23 \quad (300\text{Pass}) \quad (4)$$

となる。しかし、これは円筒研削盤における定義式であるので、今回使用した平面研削盤に適用できるかは明らかではない。また、研削開始時の表面粗さは、今回の測定では 100[pass]において測定しているため、測定開始時ではない。およそその砥石寿命として、数百 pass 程度が一応のめやすと考えることができる。

研削音で SK3 と SKD11 の上向き研削と下向き研削

の音圧レベルが、500[pass]付近で下向き研削の方が大きくなり逆転している。これは、行きの上向き研削時の研削量が十分研削されず、研削量が減少したと考えられ、砥石寿命と考えることができる。しかし、研削抵抗では、上向き研削の抵抗値の方が下向き研削の抵抗値より大きく、500[pass]付近では上向き研削が下向き研削より小さくなることはないので、音圧レベルの変動には研削抵抗以外の要因が考えられることになる。

今回の実験では工作物の表面の観察によるピピリマークや研削焼けの観察を行っていなかった。研削音の音圧レベルが変化したとき、ピピリマークや研削焼けの症状が発生していることが考えられる。したがって、砥石表面の観察による情報も考慮する必要がある。ピピリが発生すれば、表面粗さの変動が考えられるので、表面粗さの変動割合の変化も、砥石表面を表す情報として考えられる。

4. 2 ニューラルネットワークを用いたドレッシング最適時期の判定

以上の事より得られた砥石寿命の時期（ドレッシング最適時期）を研削音、研削面粗さ、研削抵抗などから、人を介さずに自動的に判断するシステムを構築することが出来れば、とても有益である。その判断にはニューラルネットワークを用いることが適していると考えられる。研削音より砥石寿命を判断することを考えると、ニューラルネットワークの入力情報には、研削音の特徴を表す 0.4kHz、2.7kHz、7.2kHz、7.6kHz 帯のスペクトルレベルが適している。出力には砥石寿命（ドレッシングの必要性の有無）とする。研削音の他に研削抵抗、研削面粗さも砥石寿命の判断材料になるので、入力に用いることができるが、これらは研削音ほど測定が容易でないため、実用的なシステムには不向きである。そのため、研削音を入力とし、研削抵抗、研削面粗さを判断の方が実用的である。また、材料の種類にかかわらず、共通のシステムで砥石寿命を判断できることが望ましい。ただし、各材料の研削音の性質には類似性が少ないので、研削音だけでは学習できない可能性が高い。よって、ニューラルネットワークには材料の違いを示す硬さなどの情報を入力する必要がある。Fig. 8に今述べたニューラルネットワークのモデルを示す。これは、隠れ層が1層の3層型ニューラルネットワークである。線形分離が不可能なパターンであっても、学習及び認識が可能であるので、学習時にはバックプロパゲーション法を用いるとよいと思われる。Fig. 8では隠れ層は5つの素子から成るが、学習状況によって変えてみる必要がある。また、

隠れ層は1層のみだが、これも学習状況により変えてみる必要がある。ただし、一般に隠れ層が2層の4層型バックプロパゲーション法であれば、複雑なパターンでも認識することが知られているので、多くても隠れ層は2層までである。それ以上増やすと、学習に膨大な時間がかかり能率的ではない。

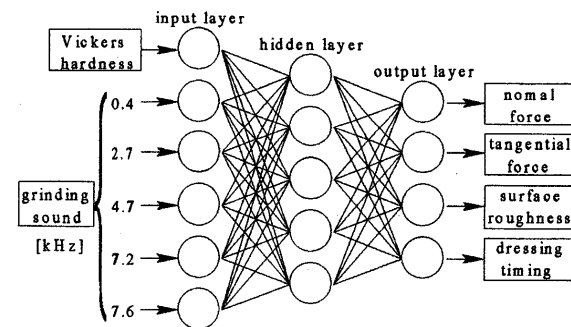


Fig.8 Hierarchy neural network to judge the dressing timing of grinding wheel.

各実験値は変動が大きいため、実測値をそのままニューラルネットワークの入力信号及び教師信号に用いると、学習が困難になると考えられるので、ニューラルネットワークに用いる値は、学習しやすいようにある程度の前処理が必要である。

ニューラルネットワークでは、学習するためのパターン情報だけではなく、学習結果から実際にその結果が正しいか判断する認識用パターン情報が必要である。学習結果に学習パターン情報を入力すれば正しい認識ができることは当然であるので、認識用パターン情報は、学習用パターンには含まれない。今回表面粗さを100[pass]ごとに計測したため、多くても20パターンしか存在せず、例えば100、300、…、1900[pass]の10パターンの値を学習用に、200、400、…、2000[pass]の10パターンの値を認識用に用いると、学習用パターンは10パターンと少ないので、ニューラルネットワークが学習できたとしても、その精度は低い可能性がある。したがって、もっと多くの認識用パターン情報を用意する必要があると思われる。

5. まとめ

平面研削盤を用いて研削音、研削抵抗、工作物の研削面粗さを測定し、研削音の性質について解析し、平面研削盤砥石の最適ドレッシング時期の判定について検討を行い、以下の点が明らかになった。

(1) 平面研削作業音の音圧レベルの増加傾向は、材料

の種類によって大きく異なり、材料の硬さとは一定の関係はない。研削作業の進行にともない、発生する音の周波数帯は材料によらず同じであるが、材料が異なるとその発生スペクトルの挙動は異なってくる。

(2) 研削音、研削抵抗それに工作物の研削面粗さとは特に一定の関係は見いだされず、研削音や研削面粗さの大きさだけでは研削現象を把握することは困難である。

(3) 今回の研削作業によるドレッシング最適時期として 300 ~ 500[pass]程度が考えられる。詳細な実験を行い諸現象の再現性や研削面に現れるビビリマーク、研削焼けの発生過程を調べるなどをすれば、ニューラルネットワークを用いたドレッシング最適時期の自動判断システムを実現することが可能と思われる。

謝辞

本実験の研削作業は、福島県ハイテクプラザいわき技術支援センターにある装置を使用させて頂きました。使用に際していろいろ配慮して頂きました、いわき技術支援センターの研究員 緑川祐二氏に感謝します。また、研削盤の使用に協力頂きました本校実習工場渡辺昇技官に感謝します。

参考文献

- 1) 小野浩二、研削仕上、pp.191、槇書店、1962