AE信号を利用した砥石摩耗に基づく 工作物形状誤差の間接測定とその補正*

和 泉 真 澄^{*1}, 李 和 樹^{*2}
若 林 忠^{*2}, 井 上 茂^{*3}

Measurement of Workpiece Form Errors due to Wheel Wear Using AE Signals and their Compensation in Grinding

Masumi IZUMI, Hwa-Soo LEE,
Tadashi WAKABAYASHI and Shigeru INOUE

In this study, a method to measure workpiece form errors due to the grinding wheel wear for NC grinding machines and their compensating method are proposed. In this method, the contact between a wheel and a dresser is monitored from AE signals during dressing process with a dresser with the AE sensor, and maximum wheel profile wears are measured from the dresser depth obtained NC programs. Workpiece form errors are measured from the relationships between wheel wears and workpiece form errors, and then workpiece form errors are compensated by repeating grinding until the workpiece form error to be less than desired tolerance. As the experimental results, it is confirmed that workpiece form errors can be measured by the AE signals after grinding accurately. Furthermore, it is shown that the compensating method proposed in this study can be used in actual grinding operations.

Key Words: Dressing, Acoustic Emission Sensor, Workpiece Form Error, Measurement, Compensation, Maximum Wheel Profile Wear

1. 緒言

研削加工の進行にともなって砥石の作業面は摩耗し後退する。NC研削盤を用いた研削加工において高い加工精度を得るためには予め加工において発生する作業面の後退量を補正する必要がある。このためには加工に先立って砥石の摩耗量を定量的に予測する必要があるが、工作物の形状、材質ならびに加工量が一定である場合をのぞくとこれを定量化することは困難である。また、要求される加工精度が厳しくなっている昨今では、加工途中において工作物を直接測定しなければならぬ大きな問題の一つとなっている。

前報では平面研削加工において砥石摩耗により発生した工作物の寸法誤差を砥石半径摩耗から測定し、工作物寸法誤差を自動的に補正するサイクルを提案してその有用性を確認した¹⁾。

本研究では、総形研削加工において砥石摩耗に基づき発生する工作物の形状誤差に着目し、研削加工後の形状誤差を機上で間接測定して自動的に補正加工を行わせるサイクルを提案するものである。

本方法では AE センサをドレッサに取付けて加工後の砥石を目直しして得られる AE 信号から砥石とドレッサの接触をとらえ、それと NC プログラムより与えられるドレッサの切込み量から最大砥石輪郭摩耗量を測定している。そして、最大砥石輪郭摩耗量と工作物形状誤差の関係に基づいて工作物の形状誤差を間接測定し、この形状誤差が所望の公差内におさまるまで繰り返し研削加工を行い形状誤差を補正している。これらの方法の有用性を確認したので報告する。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略図を示す。本実験は NC 立軸フライス盤を用いて行った。NC フライス盤のスピンドルには砥石を取り付け、テーブル上には垂直マグネット・チャックとドレッシング装置を配置し、研削加工を行える状態にしている。ドレッシング装置はパーソナル・コンピュータによりB軸回りの位置決めが可能である。砥石の切込みはテーブルのX軸の移動によって与え目直し時の砥石軸方向の送り量は砥石ヘッドのZ軸の運動によって、研削中の工作物の送り運動はテーブルのY軸方向の運動によって与えている。以下、本実験で用いた NC フライス盤を NC 研削盤と称す。

AE センサは単石ドレッサの後端部に取り付けられており、目直し時の砥石とドレッサの接触信号をとらえている。AE センサからの信号は 26dB 増幅され、折点周

* 原稿受付 1998 年 1 月 16 日。

^{*1} 正員, 日本大学大学院 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)。

^{*2} 正員, 日本大学理工学部。

^{*3} 牧野フライス精機(株) (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4029)。

Fig.1 Schematic diagram of experimental set-up

Fig.2 Workpiece loaded on a chuck

波数 100kHz のハイパス・フィルタを通過し、半波整流された電圧信号となり、デジタルメモリを介してパーソナル・コンピュータに取り込み処理した。このように処理した信号は AE アベレージ信号と呼ばれ、AE 源信号の平均的な振幅レベルを表わすことになる。以下 AE アベレージ信号を AE 信号と称す。なお、本実験では共振周波数 140kHz (エヌエフ回路設計ブロック社製、型式:AE-901S) の AE センサを使用している。

図 2 に工作物の取付け状態を示す。本実験では以下の手順で研削加工を行った。図のように工作物とアクリル樹脂材を直列に並べワンパス研削した。①のアクリル樹脂材には研削加工前の砥石輪郭形状が転写され、②の工作物を研削した後の砥石輪郭形状が③のアクリル樹脂材に転写される。加工後に①と③のアクリル樹脂材の形状を触針式輪郭形状測定機を用いて測定し、研削加工後の砥石輪郭摩耗量を測定した。また、①と②の形状の差を測定することにより加工前の砥石輪郭形状を基準とした工作物形状誤差を求めた。本研究において、砥石輪郭摩耗量とは摩耗による砥石輪郭形状の変化量

Table1 Machining conditions

Grinding process	Circular groove grinding	V groove grinding
Profile of wheel	Radius=25mm	V angle=160°
Grinding wheel	WA46G8V(φ205×20mm)	
Workpiece	SKD11(60×40mm,HRC63)	
Wheel speed	1800m/min	
Table speed	30mm/min	
Wheel depth of cut	400μm	600μm
Dressing	10μm×10pass(0.2mm/rev); 5μm×5pass(0.1mm/rev); 0μm×5pass(0.05mm/rev)	
Coolant	Soluble type

Fig.3 Wheel profiles and workpiece form in circular grinding

Fig.4 Wheel profile wears with grinding length

を示し、その変化量の最大値を最大砥石輪郭摩耗量と定義する。

本実験で用いた加工条件は表 1 の通りである。

3. 最大砥石輪郭摩耗量の測定

3・1 丸溝研削の場合 図 3 は丸溝研削加工において図 2 のように配置した工作物とアクリル樹脂材を研削し、それらの形状を測定して重ねあわせて示したものである。この研削では研削距離を 200mm としている。この図に示されたように、砥石は研削後には大きく摩耗しており工作物には形状誤差が生じていることが分かる。

図 4 は、図 3 における研削加工で研削距離が 100mm と 200mm のところでの砥石輪郭摩耗量を測定したものである。この図より、砥石輪郭摩耗量は研削距離とともに増加してゆき、研削距離 200mm すなわち工作物終端部に達したところで砥石輪郭摩耗量の最大値が約 40 μm であった。

Fig.5(a) AE signals in dressing

図 5 (a)は図 3 に示した研削後の砥石を AE センサ付きドレッサでドレッサの切込み量を砥石半径方向に $3\mu\text{m}$ とし、図 5 (b)に示した方法で逐次目直しして得た AE 信号を切込み順に並べて示したものである。目直し中の砥石とドレッサの干渉によりドレッサ後端部に取付けられた AE センサから電圧信号が出力され、砥石とドレッサの接触の有無が明瞭に表れている。ドレッサ累積切込み量が $3\mu\text{m}$ の時の AE 信号は砥石幅中央部において AE 信号のレベルが低くこの部分で砥石とドレッサが接触していないことが分かる。ドレッサ累積切込み量が増すとともに砥石幅中央部のレベルの低い非接触部分が減少し、ドレッサ累積切込み量が $42\mu\text{m}$ 以上では砥石幅全体にわたって一様なレベルの AE 信号が表れている。これらの AE 信号からも、図 3 および図 4 に示したように砥石先端部ほど砥石が大きく摩耗していることが確認できる。

AE センサ付きドレッサを用いて加工後の砥石を目直しして得られる AE 信号より、本研究では以下のようにして最大砥石輪郭摩耗量を測定した。図 6 に図 5 (a)で示したドレッサ切込み量が $39\mu\text{m}$ と $42\mu\text{m}$ の時の AE 信号と、砥石とドレッサの接触の有無を判定するために研削加工前の仕上げ目直し時で得た AE 信号をしきい値の信号としてそれぞれを重ねて示す。ドレッサの切込み量をゼロとして行う仕上げ目直しでは、砥石とドレッサが微小な接触状態にあり、この接触状態から得られる AE 信号のレベルを基準にして砥石とドレッサの接触を判定することが可能である¹⁾。本研究では前報と同様に仕上げ目直し時の AE 信号波形をしきい値とし

Fig.6 Comparison of AE signals

Fig.7 Comparison between actual amount of maximum profile wear and measured value by AE signals in circular groove grinding

て用い、これを加工後の目直し時に得られた AE 信号と比較している。

図 6 (a) のドレッサ切込み量が $39\mu\text{m}$ の場合には、砥石先端部で AE 信号のレベルがしきい値信号のレベルよりも小さい部分があり、この部分で砥石とドレッサが接触していないと考えられる。同図(a)の下図は AE 信号のレベルがしきい値信号のレベルより小さいとき False を示し、それ以上の場合は True として示したものである。この図からもドレッサが砥石先端部で接触していないことが確認できる。一方、図 (b) では、AE 信号は砥石幅全体にわたってしきい値信号を越えており、True のレベルを示していることからドレッサは砥石幅全体にわたって接触していることが確認できる。これらのことより、目直し時の AE 信号から最大砥石輪郭摩耗量は $39\mu\text{m}$ を超え $42\mu\text{m}$ 以下であると判定される。この結果は図 4 で示した砥石輪郭摩耗量の最大値 $40\mu\text{m}$

Fig. 8 Wheel profiles and workpiece form in V groove grinding

Fig. 9 Wheel profile wears with grinding length

とよく一致している。

図 7 は研削加工後の最大砥石輪郭摩耗量を AE 信号から測定した結果である。図(a)より、最大砥石輪郭摩耗量を広い範囲にわたって精度よく測定できることが分かる。同図(b)は(a)の測定誤差を示したものである。この図より本方法は最大砥石輪郭摩耗量の測定誤差が $\pm 3 \mu\text{m}$ 以内であった。これは、本実験に使用した NC フライス盤の位置決め精度を考慮してドレッサの切込み量を $3 \mu\text{m}$ として行っていることによるもので測定分解能はこれに従って $3 \mu\text{m}$ となっており、使用する NC 研削盤の精度に応じた分解能が得られたものと考えられる。

3・2 V溝研削の場合 図 8 は研削距離を 240mm と設定し V 溝研削加工を行った後の砥石輪郭形状と工作物形状を測定した結果である。この図においても前述の丸溝研削の場合と同様に、研削後の砥石には摩耗が生じており、工作物には形状誤差が生じている。

図 9 は図 8 に示した研削加工で、研削距離が 80, 160, 240mm の各距離に達した時の砥石輪郭摩耗量を測定した結果である。この図より、砥石輪郭摩耗量は砥石幅の中央部で大きく、研削距離の増加とともに増加している。また、研削距離が 240mm すなわち工作物終端部に達したところで砥石輪郭摩耗量の最大値が $37 \mu\text{m}$ であった。

図 10 (b) は同図(a)に示したようにドレッサを送り、

(a) Dressing manner

Fig. 10(b) AE signals in dressing

(b)39μm

(a)36μm

Fig. 11 Comparison of AE signals

図 8 に示した研削後の砥石を AE センサ付きドレッサで目直して得た AE 信号である。同図(b)より、ドレッサ累積切込み量の増加にしたがって AE 信号は一定のドレス長さを表す形状を示している。これは砥石先端部が最も摩耗していたため、ドレッサ累積切込み量が小さいほどドレッサと砥石の接触開始時期が遅れ、ドレッサ累積切込み量の増加とともにドレス長さが徐々に増加したためである。

これらの AE 信号より、丸溝研削加工と同様に最大砥石輪郭摩耗量を測定した。図 10(b)のドレッサ累積切込み量が $36 \mu\text{m}$ と $39 \mu\text{m}$ の AE 信号と、この研削加工前の仕上げ目直して得たしきい値信号とを図 11 に示す。

Fig.12 Comparison between actual amount of maximum wheel profile wear and measured value by AE signals in V groove grinding

図(a)のドレッサ累積切込み量が $36\mu\text{m}$ の時では、砥石の先端部に相当する部分で AE 信号はしきい値信号を下回っている。同図(a)の下図では AE 信号がしきい値信号を下回ったことを示す False のレベルが砥石先端部に相当するところで表れている。一方、図(b)の場合では、AE 信号は砥石幅全体にわたってしきい値信号を上回っており、同図(b)の下図もこれと同じ結果を表している。これらのことより、V溝研削加工後の最大砥石輪郭摩耗量は $36\mu\text{m}$ を越え $39\mu\text{m}$ 以下の範囲であると判定できる。この結果は図9に示した最大砥石輪郭摩耗量($37\mu\text{m}$)と一致している。

図12はこのようにしてV溝研削加工後の最大砥石輪郭摩耗量を測定した結果である。同図(a)より、本方法は広い範囲で最大砥石輪郭摩耗量を測定できることが分かる。一方、図(b)は図(a)の測定誤差を表しており、本方法の場合の測定誤差は丸溝研削の場合と同様に $\pm 3\mu\text{m}$ であった。

4. 工作物形状誤差の間接測定

工作物形状誤差を発生させる要因である砥石輪郭摩耗に着目し、研削後の最大砥石輪郭摩耗量を AE 信号を利用して測定し工作物形状誤差を間接測定した。図13は丸溝およびV溝研削加工における工作物形状誤差の間接測定結果である。同図(a)より、本実験の範囲では丸溝研削加工後の工作物形状誤差を $\pm 3\mu\text{m}$ 以内の誤差で間接測定し得ることが確認できた。図(b)はV溝研削加工における場合である。この図よりV溝研削加工においても本方法は工作物形状誤差を $\pm 3\mu\text{m}$ 以内の誤差で間接的に測定し得ることが確認できた。これらのことより加工後の最大砥石輪郭摩耗量を AE 信号を利用して測定し、本実験では図13に示された誤差の範囲内で

Fig.13 Measuring errors of workpiece forms

工作物の形状誤差を間接測定し得ることが確認できた。

5. 工作物形状精度補正サイクル

加工後の工作物形状誤差を機上でとらえ、所望の形状公差内に自動的に加工し得れば実用上有用である。本研究では工作物形状誤差の間接測定法を応用した簡便な工作物形状誤差補正サイクルを提案し、これを実施してこのサイクルの有用性を確認した。

図14は丸溝研削加工における形状誤差補正サイクルの流れ図である。本サイクルは NC 研削盤を対象としている。加工に必要な砥石先端半径 R 、砥石切込み深さ A 、工作物長さ L 、所望の形状公差に対応したドレッサ切込み量 T の加工条件を入力し、NC プログラムを作成する。NC 研削盤はプログラムにしたがって砥石を目直し続いて仕上げ目直しを行い、砥石とドレッサの接触を判定するためのしきい値信号を採取する。続いて、研削加工を実施する。次に研削後の砥石輪郭形状より工作物形状を評価する。ここでの評価方法は、所望の公差に対応したドレッサ切込み量 T で加工後の砥石を1パスだけ目直しして得られる AE 信号を採取し、この AE 信号としきい値信号を比較する。AE 信号のレベルがしきい値信号のレベル以上の場合、図6(b)に示したように True の結果が得られるので最大砥石輪郭摩耗量は所望の公差以内にあり工作物形状誤差もそれ以下であると判定して研削作業を終了する。そうでないときは再びドレッシングサイクルに戻りそれ以後の作業を繰り返し行い工作物形状誤差を自動的に補正することができる。このような評価基準を用いることにより種類の砥石形状にも本サイクルを大きく変更することなく適用することが可能であると考えられる。一方、V溝研削の場合における形状誤差補正サイクルは丸溝研削と同様である。

図15は研削距離がそれぞれ異なる工作物に対して本補正システムを実施して得た結果である。同図(a)に丸

Fig.14 Flow-chart of the workpiece form error compensating cycle

溝研削加工で得た結果を示す。この実験では所望の公差 $6\mu\text{m}$ に対しドレッサ切込み量を $3\mu\text{m}$ に設定して行っている。これは図 13(a)に示したように本方法の測定誤差は $\pm 3\mu\text{m}$ 以内であったためである。図 15 (a)より研削距離の増加とともに工作物形状誤差は増加し、第一回目の研削加工ではいずれも公差内に加工し得ていない。本サイクルはこの形状誤差を最大砥石輪郭摩耗量より間接測定し、工作物形状誤差が公差内に加工し得ていないと判断して、第二回目以降の研削加工を行い、確実に工作物形状誤差を減少させている。図 15(b)は同様にしてV溝研削加工に適用した結果である。この場合も、研削距離の増加とともに工作物形状誤差が増加し、第一回目の研削では公差内に加工し得ていない。本サイクルはこの形状誤差をとらえ第二回目以降の研削加工を行い、確実に工作物形状誤差を減少させている。これらのことより、本補正サイクルは総形研削加工で発生した工作物形状誤差を AE 信号を用いて最大砥

(a) Circular groove grinding

(b) V groove grinding

Fig.15 Decreasing process of workpiece form errors in the proposed cycle

石輪郭摩耗量から間接測定し自動的に補正することが可能であることを確認できた。

6. 結言

本研究は AE センサ付ドレッサを用い NC 研削盤を利用した総形研削加工における最大砥石輪郭摩耗量の測定法、工作物形状誤差の間接測定法および工作物形状誤差補正サイクルを提案し、これらの有用性が実験的に確認できた。主な結果は以下の通りである。

- 1) AE センサ付きドレッサを用いて総形研削加工後の最大砥石輪郭摩耗量を定量的に測定することができる。
- 2) 工作物形状誤差を最大砥石輪郭摩耗量から間接的に自動測定する手法の有用性を実験的に示した。
- 3) 総形研削加工における工作物形状誤差補正サイクルを提案し、本実験の場合工作物形状誤差を設定した公差 $6\mu\text{m}$ 以内に加工することができた。

参考文献

- (1) 和泉真澄, 李和樹, 若林忠, 井上茂; AE 信号を利用した砥石摩耗に基づく工作物寸法誤差の測定とその補正, 機論, 63-613, C(1997), P.334~339.