超砥粒砥石の目直し液循環型 インプロセス目直し法の開発(第1報)*

—目直し原理と一、二の実験的検討—

安井平司** 田中勇輔*** 松田 清*** 坂本竜司郎***

Development of Dressing-Fluid Circulation In-Process Dressing Method for Super Abrasive Wheel (1st Report)
—Dressing Principle and Some Experimental Investigations—

Heiji YASUI, Yusuke TANAKA, Kiyoshi MATSUDA and Ryushiro SAKAMOTO

The research deals with the development of the high efficient in-process dressing method for super abrasive wheel. The new type of dressing method in which the bond is removed efficiently by circulating the dressing-fluid into the contact area between the wheel and the rectangular column type of grinding stone is devised. The dressing-fluid is made by mixing the abrasive grains in the grinding fluid. The in-process dressing system in which the dressing-fluid is circulated during the grinding operation is manufactured on trial. The new type of dressing method is ascertained useful for dressing of metal bonded CBN wheel. Using the in-process dressing system, no occurrence of loading is found for long time grinding of aluminum alloy in which loading occurs easily in ordinal grinding process.

Keywords : CBN wheel, In-process, dressing, grinding, dressing stick, loose abrasive, wheel surface evaluation

1. はじめに

超砥粒砥石の形直し・目直しは現在も多くの課題を抱えている。その内の一つとして、研削作業中におけるインプロセスでの適用が容易な目直し技術の構築が考えられる。インプロセスでの適用を最も簡単に考え得る目直し法の一つとして、現在、一般的に用いられている角形状スティック砥石（以下、単に、スティックと記す）を超砥粒砥石に押付けて行う目直し法（以下、スティック目直し法：ST目直し法と記す）の自動化がある。しかしながら、ST目直し法は、目直し能率が悪く、砥石作業面の均一な目直しが安定的にできないという問題がある¹⁾。

この観点から、新たに、「スティック支援目直し液循環型目直し法（Stick Aided Dressing-Fluid Circulation Dressing Method: 以下、SADFC目直し法と記す）」を考案した。この方法は、砥粒を含有した研削油剤（以下、目直し液と記す）を、砥石と砥石に押付けたスティックとの間に流入させる方法である。なお、目直し液作製用研削油剤は、研削に使用するのと同じである。本報告では、考案した目直し法を、実際に使用するためのシステムを設計・試作し、目直しへの適用の可能性を検討した。その結果、目直し法として使用できることを確認した。さらに、目つまりが生成し易いアルミニウム合金の研削にインプロセス目直し法として用い、その有用性を示した。

2. スティック支援目直し液循環型目直し法

2.1 目直し原理と目直し方法

先に、角テーブル型平面研削盤を用いて、ST目直し法による超砥粒砥石の目直し機構を検討した¹⁾。そして、ST目

Fig.1 Principle of dressing-fluid circulation dressing method (SADFC dressing method)

直し法では、超砥粒砥石によってスティックが研削され、生成された砥粒粉で、結合剤を除去することによって、チップポケットの生成が行なわれることを見いだした。しかし、目直し能率が悪く、砥石作業面の均一な目直しが安定的にできないという問題があった¹⁾。そこで、その目直し機構を改善するために、砥石幅の溝をつけたスティックの溝内に、遊離砥粒を希釈倍率の低い高粘性の研削油剤に混ぜて静置し、その状態で、プランジ研削することにより目直しを行うSLAD目直し法を開発した¹⁾。SLAD目直し法では、砥石-スティック接触領域内に遊離砥粒を多数存在させ、スティック表面の空孔による遊離砥粒の保持作用を利用して、結合剤除去作用を効果的に用いることができる。しかし、その方法では、目直し能率や砥石作業面の目直しの均一性は改善されたものの、遊離砥粒を砥石-スティック間に自動的に供給することが難しく、インプロセスで目直しを行う技術の構築には至らなかった。このようなことから、本研究では、SLAD目直し法を発展させ、遊離砥粒によるチップポケットの生成原理を用いた、新たなSADFC目直し法を開発した。

図1に、角テーブル型平面研削盤に、SADFC目直し法を

* 原稿受付 平成20年7月14日

** 正会員 熊本大学大学院自然科学研究科(熊本市黒髪2-39-1)

*** 学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科

適用した場合を模式的に示す。砥石の右方向からスティックを超砥粒砥石に押付け、砥石とスティックの接触領域に目直し液を供給する方法である。ST 目直し法に比較して、砥石-スティック接触領域内で、結合剤を除去する砥粒が格段に増加する。また、砥粒は、スティックの空孔で、移動を妨げられ、結合剤を除去する割合が大きくなるために、目直し能率向上が期待される。

2.2 インプロセス目直し法への適用

図2に、SADFC 目直し法をインプロセスで用いる場合の概要を示す。スティックを砥石右方向から押当てる。スティックの送り速度は、コンピュータによって制御される。その際、スティック後部にロードセルを装着し、法線目直し抵抗を測定し、目直し状態を常に監視する。目直し液FDは、砥石-スティック接触領域の上方から供給する。

一方、研削油剤の供給は、図2に示すように、2ヶ所から行う。一つは、ノズルAで、砥石-スティック接触領域と研削点である砥石-工作物接触領域の中間付近から、砥石の半径方向に供給する。ノズルAは、砥石円周面に対向して、間隙をもって設置されているノズル支持板に取付けられている。その結果、研削油剤は、図2に示すように、支持板の上方側(FGA)_{up}と下方側(FGA)_{down}に分かれて流出する。上方側に流出する研削油剤は、目直し液が砥石-スティック接触領域から下方に、砥石の回転とともに連れ回るのを阻止する役割をする。この役割は、砥粒を含む目直し液が研削点に浸入するのを防止するために必要で、本インプロセス目直しを行う上で非常に重要である。この上方側に流出する研削油剤(FGA)_{up}は、目直し液FDと混ざり、遊離砥粒を含む混合液FMとなるので、研削点に流入しないように、目直し液収集テーブル上を流動させ、工作物テーブルの左方向の研削液回収口から回収する。これに対して、下方側に流出する研削油剤(FGA)_{down}は、研削点における冷却や潤滑の役割を果たす研削油剤になる。

もう一つの研削油剤FG_Bの供給は、ノズルBから行うもので、ノズルAから下方側に流れる研削油剤(FGA)_{down}も加えて、研削点における冷却と潤滑を行う。これら(FG_B)と(FGA)_{down}の研削後の切り屑を含む混合液(FG)_{chip}の回収は混合液FMと別途の経路によって行う。

図3に、研削液と目直し液の循環経路を示す。目直し液FDとノズルAから供給された研削油剤の内の上方に流出する研削油剤(FGA)_{up}の混合液FMは、図に示すように、回収テーブル上を経て、回収テーブル左方から、回収パイプを通して、回収タンクTankCの底部側から回収される。回収した混合液FMの底部側の遊離砥粒濃度の濃い部分FMDは、羽根車によって攪拌し、目直し液として再使用する。一方、回収ポンプ上部の遊離砥粒をほとんど含まない混合液FMの一部FMRを、回収タンクTankCから溢れさせ、砥粒濃度の薄い混合液用備蓄タンクTankHに流入させる。この混合液用備蓄タンクの混合液FMRは、さらにポンプを用いて、備蓄タンクから遠心分離器を設置した砥粒・切りくず分離タンクTankSに送られる。一方、研削点で、工作物の研削加工において冷却と潤滑の役割を果たした、切り屑を含んだ研削油剤(FG)_{chip}は、別経路で、砥粒・切りくず分離タンクTankSに送られる。砥粒・切りくず分離タンクTankSに導かれた混合液FMRと研削油剤(FG)_{chip}は遠心分離器で、砥粒・切りくずと研削油剤FGに分離される。研削油剤は

Fig.2 Schematic of dressing-fluid circulation dressing method

Fig.3 Circulation system of dressing-fluid and grinding fluid

(a) Flow rate 4 l/min (b) Flow rate 16 l/min
Fig.4 Surface roughness of aluminum alloy plunge-ground without abrasive-cleaning

【CBN140Q100M, Soluble(1/50), $V_G=30\text{m/s}$, $v_W=5\text{m/min}$, $t_G=5\mu\text{m/pass}$, Loose abrasive(WA #320), Stick (WA #180), $f_b=350\text{nm/rev}$ 】

そのまま再利用される。また、分離した砥粒と切り屑の混合物は、別途除かれる。なお、本試作システムでは、砥粒と切りくずの分離は行い得ていない。以上のように、本インプロセス目直しシステムでは、(1) 目直し液による結合剤の除去による目直し機能としての必要条件に加えて、(2) 遊離砥粒を含む目直し液の研削点への混入防止機構が十分条件として必要である。

図4に、ノズルAを用いた研削油剤の供給をせず、すなわち、ノズルAによる目直し液の研削点への浸入防止を行わずに、ノズルBによる研削点への研削油剤供給のみを行って、インプロセス SADFC 目直しを用いた、アルミニウム合金のプランジ研削後の仕上面を示す。ノズルBからの研削油剤供給量を変えて検討している。なお、この場合の

Fig.5 Feed mechanism of dressing stick using ball screw under watching of dressing pressure due to load cell

実験では、ノズル B から供給する研削油剤は、砥粒・切りくず分離タンクからの回収研削油剤は使用せず、別途準備したタンクからの新鮮な研削油剤を供給している。図より、アルミニウム合金仕上面には、いずれの研削油剤供給量の場合も、通常の研削によって生成される研削条痕に加えて、圧痕が観察される。目直し液に含まれる遊離砥粒が研削点に混入して、生成されたものである。研削油剤供給量を増加すると、研削点への遊離砥粒の浸入が抑制され、圧痕の数が減少するが、十分でないことがわかる。

3. 実験方法および条件

実験は、横軸平面研削盤に本考案システムを製作して行った。砥石上方の砥石カバーには、別途に開発した²⁾、全自動砥石作業面評価システム用の顕微鏡が装備されている。なお、顕微鏡の対物レンズ部は、チップポケット深さ評価用の触針式粗さ計触針ヘッドと交換可能である。このシステムでは、砥石作業面上の切れ刃の分布・摩耗状態や目つまりの状態およびチップポケット深さをほぼ自動的に測定・評価できる。目直し用のスティックは、図 5 に模式的に示すように、モータ駆動をボールねじに伝え、ボールねじの回転運動をスティック支持台の直線運動に変えて、砥石に押込む。その際、目直し抵抗をスティック後部に取付けられたロードセルによって監視する。

表 1 に、本実験で用いた主な目直し条件と研削条件を示す。目直し用のスティックの粒度は #180 で、遊離砥粒には、粒度 #320 の WA 砥粒を用いた。目直し液の砥粒濃度は 10 重量%である。研削実験では、目つまりが生成し易いアルミニウム合金をメタルボンド CBN 砥石でプランジ研削した。なお、1 研削パスは、長さ 30mm のアルミニウム合金を 1 回プランジ研削することを意味する。

4. 目直し過程における砥石作業面の变化

図 6 に、アルミニウム合金を 500 パス研削し、目つまり状態にした砥石作業面を SADFC 目直し法で目直した場合の砥石作業面の变化を示す。図 6(a)は、目直し前に、目つまり（赤点線で囲んだ部分）が大きく発生している砥石作業面であるが、図 6(b)よりわかるように、目直し時間 $T_D=30$ 秒を行うと、目直し前に砥石作業面を覆っていた目つまりが除去され、切れ刃が明瞭に顕出している。

図 7 に、図 6 (b)の状態を形直しし、ボンドテールを生じさせた状態の SADFC 目直し過程における砥石作業面の变化を示す。図 7(a)から(d)でみると、目直し前の図 7(a)のボンドテール（赤点線で囲んだ部分）上にみられる工作物との擦過条痕が、 $T_D=30$ 秒の図 7(b)よりわかるように、除去されている。また、図 7(b)では、砥石作業面の砥石内周側

Table 1 Experimental conditions

Common conditions	
Wheel	CBN140Q100M $D_G \times B_G \times D_L: \phi 200 \times 12 \times \phi 50$ mm
Grinding fluid	Soluble(1/50), Flow rate:12l/min
Wheel speed	$V_G=30$ m/s
Grinding conditions	
Grinding method	Plunge grinding
Depth of cut	$t_G=5$ μm/pass
Table speed	$v_W=5$ m/min
Workpiece	Aluminum alloy (JIS A5025) $L_W \times B_W: 50$ mm $\times$ 10mm
Dressing conditions	
Dressing fluid	Loose abrasives:WA#320 Content of abrasives:10wt% Flow rate:7.5l/min
Stick	WA#180 Breadth $\times$ Thickness $\times$ Length : 25mm $\times$ 30mm $\times$ 105mm Stick feed: $f_D=350$ nm/rev

(a) Before dressing (loading) (b) $T_D=30$ sec

Fig.6 Removal of loading by SADFC dressing method
【CBN140Q100M, Al (A5025), Soluble (1/50), $V_G=30$ m/s, Loose abrasive (WA #320), Stick (WA #180), $f_D=350$ nm/rev】

(a) Before dressing (loading) (b) $T_D=30$ sec

Fig.7 Behavior of wheel surface with SADFC dressing process
【CBN140Q100M, Soluble (1/50), $V_G=30$ m/s, Loose abrasive (WA#320), Stick (WA #180), $f_D=350$ nm/rev】

(a) Small magnification (b) Enlarged magnification

Fig.8 WA stick surface of #180 grain size after SADFC dressing

部分の結合剤色が黄褐色に変化しており、目直しが良好に行われているのがわかる。さらに、図 7(c)の目直し時間 $T_D=300$ 秒では、ボンドテールを含む結合剤が大きく除去される。目直しをさらに続け、目直し時間 $T_D=1200$ 秒になると、 $T_D=300$ 秒では、顕微鏡の焦点が合っていた結合剤部に、

焦点が合わなくなり、チップポケット深さが大きくなる。

図8に、SADFC目直しに使用したスティックの表面を示す。図より、目直しにより、WAスティック表面の砥粒逃げ面が平らになっているの多く見られる。また、スティック表面には空孔が多数存在するのがわかる。遊離砥粒はこの空孔に入り、移動を一時的に阻止され、別報で報告したような、結合剤を除去する作用を行うと考えられる。

図9は、ST目直し法で約120秒目直し後、SADFC目直し法に変えて目直し液を上方から流した場合の目直し抵抗の変化を示す。ST目直し初期では、目直し時間とともに目直し抵抗は急速に上昇する。しかし、その後、上昇率は減少し、ほぼ一定の値に収束する傾向を示す。これは目直し初期では押込み量の全量が除去されず、切り残しを生じる。このため、目直し抵抗も小さくなる。しかし、目直し時間が経過し、切り残し量を加えた、押込み量が大きくなり、押込み量の全量が除去されるようになると、押込み量に対応する目直し抵抗になるためと考えられる。しかし、SADFC目直し法に変え、目直し液を供給すると目直し抵抗は減少し始め、最終的にある小さな目直し抵抗に収束する。このようなことから、遊離砥粒は結合剤を除去するとともに、スティック表面の砥粒も破壊、脱落させていると思われる。言い換えれば、スティック表面の空孔に一時的に保持されている可能性が強いことを裏付けていると考えられる。

図10に、SADFC目直し過程における平均チップポケット深さ H_{cp} と砥石作業面性状（平均切れ刃面積率 η 、平均切れ刃密度 n_p 、連続切れ刃間隔 a ）の変化を示す。図より、目直し時間1200秒程度までは、チップポケットは、ほぼ直線的に増大する。一方、切れ刃面積率 η （砥石見掛け面積に対する切れ刃逃げ面摩耗面積の割合%）や切れ刃密度 n_p は600秒程度まで減少する。これに伴って連続切れ刃間隔は長くなる。しかし、その後は、徐々に変化率が小さくなり、最終的にはほぼ一定の値に収束する傾向を示す。このような目直し過程におけるチップポケットおよび砥石作業面性状の変化は、容易に考えられるように、目直し前の砥石作業面の状態と目直し条件によって、定量的には変化する。しかし、定性的には、図のように、目直し初期に変化し、その後、ある砥石作業面状態に収束するように変化するのは同様と考えている。別報で、詳細に検討する予定である。

5. インプロセス目直し適用による研削仕上面粗さの向上

図11に、良好な砥石作業面状態にした砥石を用い、目つまりの発生し易いアルミニウム合金をプランジ研削する場合において、インプロセスSADFC目直しを使用する場合と使用しない場合の同一砥石作業面の変化を比較して示す。なお、研削は500パスまで行っている。図11(a)より、インプロセスでSADFC目直しを使用しない場合には、目つまりが、a・c・d(切れ刃上部)、b(切れ刃周辺)の4ヶ所に生成している。しかし、図11(b)のように、SADFC目直しをインプロセスで使用すると、目つまりは見られない。また、切れ刃には脱落や破壊も見られず、SADFC目直し法が有効に作用していることがわかる。

図12に、図11に示したアルミニウム合金の研削における仕上面と仕上面粗さを示す。図よりわかるように、インプロセスSADFC目直しを使用しない、通常のプランジ研削では、仕上面に、研削条痕に加えて凝着痕が見られる。ま

Fig.9 Comparison of dressing forces with ST dressing and SADFC dressing

【CBN140Q100M, Soluble (1/50), $V_G=30\text{m/s}$, Loose abrasive (WA#320), Stick (WA#180), $f_D=350\text{nm/rev}$, Total dressing time (350sec)】

Fig.10 Change of chip pocket, cutting edge ratio, cutting edge density and successive cutting edge spacing with SADFC dressing time
【CBN140Q100M, Soluble (1/50), $V_G=30\text{m/s}$, Loose abrasive (WA#320), Stick (WA#180), $f_D=350\text{nm/rev}$ 】

Fig.11 Effect of in-process dressing on loading formation in grinding of aluminum alloy

【CBN140Q100M, Al(A5052), Soluble (1/50), $V_G=30\text{m/s}$, $v_w=5\text{m/min}$, $t_g=5\mu\text{m/pass}$, Loose abrasive (WA#320), Stick (WA#180), $f_D=350\text{nm/rev}$ 】

た、仕上面粗さ $H_{rp}=7.8\mu\text{m(Rz)}$ 程度と粗い仕上面になっている。一方、SADFC目直しをインプロセスで適用した場合には、研削条痕で形成される正常な滑らかな仕上面となり、その仕上面粗さも約 $3.7\mu\text{m(Rz)}$ である。

以上のようなことから、インプロセス SADFC 目直し法は、目つまりを抑制しながら正常な研削加工が長時間できる有用なインプロセス目直し法と考えられる。

6. 間欠型インプロセス目直し法の検討

SADFC 目直し法を全研削加工時間中においてインプロセスで用いると、スティックの消耗量が大きくなり、その交換時間が増加する。そこで、スティックの消耗量を少なくできる、間欠型のインプロセス SADFC 目直し法を検討してみた。

図 13 に、試みた間欠型インプロセス SADFC 目直し法と、その目直しを用いて得られた砥石作業面と工作物仕上面を示す。図 13(a)は、試みた間欠型インプロセス SADFC 目直し法を示す。上述の図 11 での連続型インプロセス SADFC 目直し法による 500 研削パス後に、1000 研削パスまで、スティック押込み量が 0.05mm (3 秒間の目直し時間に相当) 毎にスティック押込みを 5 秒間止め、また、1000 研削パスから 1500 研削パスまではスティック押込みを 10 秒間止める方法で行った。図 13(b) と (c)は、この両間欠型インプロセス SADFC 目直し法を行った後(1500 研削パス後)の砥石作業面と研削後の工作物仕上面を示す。図より、1500 研削パス後の砥石作業面は、図 11(b)に示した、連続型インプロセス SADFC 目直し法を用いて 500 研削パス後とほぼ同じである。また、工作物仕上面も研削条痕のみにより滑らかに形成されており、間欠型インプロセス SADFC 目直し法の研削でも、大きな効果を発揮し、有効な目直し法といえる。

図 14 は、図 13 に示す、連続型から 2 種類の間欠型のインプロセス SADFC 目直し終了までのチップポケットの変化を調べたものである。図より、チップポケット深さは幾分増大するが、ほぼ変化していないことがわかる。チップポケットの生成状態は、研削特性に影響することが考えられ、今後検討する予定であるが、本実験ではその影響がない範囲で行えたことを示す。

7. まとめ

超砥粒砥石にスティックを押付け、その間に遊離砥粒を含有する研削油剤 (目直し液) を流入させるインプロセス適用可能なスティック支援目直し液循環型目直し法 (SADFC 目直し法) を考案した。そして、その方法が使用

(a) Grinding process with step in-process dressing of T_{PAU} "A" and T_{PAU} "B"

Fig.13 Influence of dressing pause time on wheel surface and workpiece surface after grinding of 1500passes under in-process SADFC dressing during plunge grinding of aluminum alloy

[CBN140Q100M, Al(A5052), Soluble (1/50), $V_G=30\text{m/s}$, $v_W=5\text{m/min}$, $t_G=5\mu\text{m/pass}$, Loose abrasive (WA#320), Stick (WA#180), $f_D=350\text{nm/rev}$, $T_{pus}=0.5, 10\text{sec}$]

Fig.14 Change of chip pocket with dressing process

可能な目直しシステムを設計製作した。そのシステムを用いて、アルミニウム合金が凝着したメタルボンド CBN 砥石作業面の目直しを行い、短時間で目つまりを除去することができることが確認できた。また、同じ実験で、ボンドテールの除去も可能であることがわかった。さらに、SADFC 目直し法をインプロセスで適用しながら、砥石作業面に凝着が生じ易いアルミニウム合金のプランジ研削加工を行い、そのインプロセスでの適用の可能性を検討したところ、砥石にアルミニウム合金の凝着を生じさせずに、長時間にわたって研削ができることがわかった。また、スティック消耗量が少なくすむ間欠型インプロセス SADFC 目直し法も検討し、可能性があることを示した。

おわりに、砥石と研削液の提供をいただいた(株)ノリタケスーパアブレーシブとユシロ化学工業(株)の各社に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- Heiji YASUI, Hiroshi NAKAZONO and Makoto KURUSU: A New Efficient Dressing Method of the Resin Bond CBN Wheel, Int. Journal of Japan Society for Precision Eng., 25, 2 (1991) 98.
- 安井平司, 田中勇輔, 丸尾賢二, 神谷隆仁, 坂本竜一郎: 超砥粒砥石作業面の自動評価システムの開発 (第1報) 精密工学会誌, 74, 12 (2008) 1313