研究

パッチ研削装置の研削性能*

—任意境界形状を有する底面研削加工法に関する研究 (第2報)—

岸浪建史** 斉藤勝政** 佐藤 真*** 井田利夫† 蔵田 満†

The Grinding Characteristics of Patch Grinding Method

—A Study of Application of Patch Grinding Method to the Bottom Grinding with Complex Boundary Shape (2nd Report)—

Tateshi KISHINAMI, Katsumasa SAITO, Makoto SATOU, Toshio IDA, Mitsuru KURATA

In order to make a possibility of complex bounded bottom grinding, a square patch grinding apparatus was developed from the view point of practical use. And grinding characteristics of "4-2" square patch grinding method so called Square Patch Grinding Apparatus, were shown for cast iron by using the CBN formed shape grinding tools. The results obtained were as follows.

- (1) The possibility of complex bounded bottom grinding was recognized by using the square patch grinding apparatus and NC machine tools.
- (2) With "4-2" square patch grinding apparatus it was possible to get about 0.2 mm roundness of corner sharpness for cast iron by using #80 CBN formed shape grinding tools.

1. 緒 論

正 n 角形領域を K 個の頂点を有する砥石形状で研削する方法を“ $n-K$ ”パッチ研削と呼び、前報¹⁾でこの“ $n-K$ ”パッチ研削における砥石形状、砥石運動、砥粒軌跡、砥粒速度の一般解を導出した。

これら“ $n-K$ ”パッチ研削の中で実用的に重要と考えられるのは、 $n=3$ 及び 4 の場合であって、 $n=3$ の正三角形パッチ研削は、 60° の頂点角まで研削できることからその適用範囲は広いが、一般に砥石の縦横比が大きいため砥石先端部での強度不足、及び砥石形状が円弧でないためその成形加工に欠点を持っている。

一方、 $n=4$ の正方形パッチ研削においては砥石頂点数 K は 1, 2, 3 を取りうるが、特に $K=2$ の場合、砥石外周が二つの円弧で構成されることからその成形加工が単純であって、パッチ研削装置自体で砥石外周のドレッシングが可能である大きな利点がある。さらに金型キャビティ等のくぼみ部の底面研削においては直角隅部あるいは、それに近い境界形状の可能性が大きいと考え、“4-2”パッチ研削装置を試作した。

この試作した“4-2”パッチ研削装置の研削性能を明ら

かにするため、砥石として CBN 電着砥石を用い、被削材として FC 25 を用いた研削実験を行い、直角隅部研削加工精度、仕上面粗さ、設定切込みに対する実切込み、及び砥石の摩耗特性を実験的に明らかにしたので報告する。

2. “4-2”パッチ研削装置の試作

2.1 “4-2”パッチ研削装置の構造

試作した“4-2”パッチ研削装置の本体部写真とその構造図を図 1 に示す。すなわち前報¹⁾で述べたように“4-2”パッチ研削装置は図 2 に示す固定円 C_s (半径 r_s) に内接しながらころがり接触運動を行う動円 C_t (半径 r_t , ただし $r_t=r_s/2$) を考え、この動円 C_t 内に半径 $\sqrt{2}r_t$ の二つの円弧から構成される木の葉形の砥石を想定すると、この砥石外周が構成する包絡面が正方形になることを応用したものであって、固定円 C_s は図 1 の構造図の内歯車①に相当し、ストップ②によって固定される。動円 C_t に相当するスピンドル上の歯車③のピッチ円は、内歯車のピッチ円半径の 1/2 になるように設計されている。装置本体はテーパシャンク部④を立フライスのスピンドル軸に取付けることにより回転動力を得る構造となっている。木の葉形の砥石は、スピンドル⑤に取付けることにより砥石の自転、公転を同期させ図 2 に示す砥石運動を行わせることができる。

なお、このパッチ研削装置は

* 原稿受付 昭和 53 年 8 月 31 日。昭和 53 年度 精機学会 春季大会学術講演会 (昭和 53 年 4 月 1 日) にて発表。

** 正 会 員 北海道大学工学部 (札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

*** (株) 牧野フライス製作所 (東京都目黒区中根 2-3-19)

† 学生会員 北海道大学大学院

図1 “4-2” パッチ研削装置の構造図

$$\frac{r_t}{r_s} = \frac{K}{n} = \frac{1}{2}$$

条件1)

条件1)を満たすように設計されているため、円弧から構成される K 頂点砥石を用いれば正 $2K$ 角形パッチ研削(ただし $K=2, 3, 4, \dots$)を行わせることができる。

また図1においてハウジング⑥, ⑦をねじ止めで適当な位相角(図2の θ)に固定することができるため、スピンドル⑤に砥石を取付けた状態でストップ①を取りはずすことにより砥石外周のドレッシングを行うことができる。

2.2 “4-2” パッチ研削における砥石形状と砥粒の選定

砥石としてはビトリファイド砥石等の成形加工とドレッシングによって図2に示す木の葉形の砥石を作ることできるが、本実験においては図3に示すCBN電着砥石を用いた。すなわち“4-2”パッチ研削用砥石は2個の頂点を持ち頂角が 90° であるため砥石頂点強度を考慮して砥石本体を鋼で構成し、その表面に耐摩耗特性にすぐれていると言われるCBN砥粒²⁾³⁾を電着によって固定した。

このCBN電着砥石は切りくずの掃出、及び砥石のスピンドル軸への取付けのため、図3に示すようなスリット、及び中ぐりを施し、側面は幅約3mmにわたってCBN砥粒を電着したものである。

図2 “4-2” パッチ研削装置の原理図

2.3 “4-2” パッチ研削装置の静剛性

“4-2”パッチ研削装置の静剛性を知るために砥石スピンドルに木の葉形の砥石を取付け図1に示す r, θ, z 軸方向に荷重を加え立フライスのベッドと砥石の基準面間の変位を求めた結果 r, θ 方向においては4kg荷重に対して砥石外周端面で約 $15\mu\text{m}$ ほど、また z 軸方向は30kgに対して約 $5\mu\text{m}$ ほど変位することが実験的に確かめられた。したがって z 軸剛性は、 r, θ 方向に比べて十分剛性が高いと言える。

3. “4-2” パッチ研削装置の研削性能

3.1 パッチ研削実験手順

パッチ研削加工装置全景を図4に示す。すなわちパッチ研削装置①のテーパシャンク部をNC立フライス(牧野フライス社製KHNCP-70)のスピンドル部に取付け、パッチ研削装置のストップを適当なジグ③で固定できるようにしてある。この時、パッチ研削領域の方向を調

図3 “4-2” パッチ研削用CBN電着砥石

1: “4-2” パッチ研削装置, 2: CBN 電着砥石,
3: ストップバジグ, 4: 被削材 (FC25)

図4 “4-2” パッチ研削加工装置全景

整するためストップは任意の位置で固定できる。

砥石は図3に示す寸法の砥石外形であるため本実験装置で得られる正方形パッチ研削領域は約 42.4×42.4 mm である。パッチ研削実験は

イ) “4-2” パッチ研削の特徴である直角隅

部での研削特性及び研削加工形状精度の検討

ロ) 設定切込みに対する実切込み及びスパークアウト研削時の除去量, 仕上面粗さの解析

ハ) 研削量に対する砥石, 砥粒の摩耗進行経過の観察を目的とし, 図5(a), (b)に示す工具駆動方式のもとに行われた。

実験条件は, 被削材として被研削性が良好な FC25 を, 又, 研削油として灯油を用いた。使用砥石は粒度 #80 CBN 電着砥石 (特注) である。主軸回転数 N は 2350 rpm, 送り速度 f , 設定切込み d はそれぞれ 50 mm/min, 10 μ m に限定した。

3.2 直角隅部での研削性能と加工形状精度

パッチ研削装置のみかけ上の被削材との接触面積, すなわち研削領域は図5(a)における斜線部 $T_1T_2T_3T_4$ 領域であって研削砥石の大きさから見た接触面積は他の研削方法に比較して著しく大きいにもかかわらず, NC 立フライス盤のスピンドル回転数は, パッチ研削装置と

図5

しては低いため z 軸方向への垂直送りによる研削方法は実際上困難であった。そのため直角隅部における“4-2”パッチ研削装置の研削性能を実験的に明らかにするため図5(a)に示す一種のトラバース研削方式を採用した。

すなわち, 実験手順としては被削材表面から適当な高さを持ち, 被削材領域外の点Oから被削材表面から適当な切込み d を有する点1にパッチ研削装置を垂直降下させ, 設定回転数 N , 設定送り速度 f に従って点1より工具経路 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ に沿って駆動することにより直角隅部 (B 点近傍) での研削性能を観察した。

#80 CBN 電着砥石を用いたパッチ研削領域のフロントエンド T_1T_4 線が, 図5(a)の適当な CF 線に達した状態で研削を中止し, 研削途中の研削条痕を観察したのが図6(a)である。同図より明らかなように, パッチ研削の進行方向に垂直なフロントエンド面において被削材は一様には研削されておらず, いくつかの代表的な砥粒軌跡を観察することができる。

(a) パッチ研削におけるフロント
エンド仕上面
研削条件
砥粒: #80 CBN, 主軸回転数: 2350 rpm, 送り速度: 50 mm/min, 切込み: 10 μ m,
研削油: 灯油, 被削材: FC 25

図6 “4-2”パッチ研削装置による研削仕上面

これはパッチ研削の研削初期によくみられる現象で, 砥粒が砥石面に一樣な高さで分布しているのではなく, いくつかの砥粒のみが切削作用を行っているためと推察される. また砥石底面には図3に示すようにスリットが設けられているため, その部分では砥粒が存在しないことによる研削面の不均一性が現れることも同図より確認できる. しかし砥石面の摩耗が進行するにつれ, このような不均一性は少なくなり, また x 及び y 方向にパッチ研削装置をトラバースすることにより, 研削面の不均一性は補われ, 図6(b)に示すような直角隅部まで含めた一樣な研削が可能である.

直角隅部における形状精度を確認するために, 拡大顕微鏡写真をとり図6(c)に示した. 同図より砥粒の条痕が観察され, 直角隅部は砥石の先端部近傍の砥粒の直線往復運動による切削作用によって創成されることが分かる. したがって直角隅部形状精度は砥石先端部における砥粒の大きさ, 砥粒位置によって影響を受けることになるが, 本実験結果から#80 CBN 電着砥石においても直角隅部丸み半径は約0.2 mm程度まで可能であることが確認された.

一般にパッチ研削における境界形状の加工精度は, 研削装置の工作精度, 剛性, 及び砥石形状精度によっても影響を受けるが, 本実験結果から見るとむしろ砥石外周及び先端部に砥粒が存在しているかないかによって形状精度は大きく影響を受けると考えられる. このようにパッチ研削領域内に限ってみれば形状精度はそれほど高くないが, このパッチ研削領域をトラバースすることにより研削領域の境界の直線性, あるいは直角隅部の形状

精度は実際の要求を十分満たす程度にまで研削できることを確認した.

3.3 “4-2”パッチ研削における仕上面粗さと研削除去量

“4-2”パッチ研削においてパッチの各部で砥粒軌跡, 砥粒通過密度が異なるため仕上面粗さはパッチの各部で異なると考えられる.

しかし実際には, パッチ研削装置をトラバースするためトラバース方向に対しては仕上面粗さは比較的短い距離に対しては均一であ

ると考えられる. また仕上面粗さ及び除去能率は, 砥粒粒度, 被削材性質, 主軸回転数 N , 送り速度 f , 切込み d の関数と考えられ, 若干の予備実験から同一条件では, 主軸回転数を増加させ, 送り f , 切込み d を減少させることにより仕上面粗さは改善されることが確かめられているが, 3.1節で述べた研削条件の下で, トラバース方向に対して左側の適当な研削領域内の任意の点に着目し, 研削の時間的経過による仕上面粗さ性状の変化について観察を行った.

ここで研削量(研削面積 $\times$ 設定切込み $\times$ 研削回数)なる量を導入すれば研削条件を一定とすることにより, 仕上面粗さの時間的变化は, 研削量と仕上面粗さの関係で表すことができる.

図7(a), (b), (c)は図5(b)の研削経路①を順次繰返す実験手順に従い, 研削量60 mm³, 150 mm³, 400 mm³における#80 CBN 砥粒を用いたFC 25の仕上面性状の顕微鏡写真を示すものであって, 研削初期においては, 砥粒の一方方向の条痕のみが観察される. これは砥石先端部近傍にある砥粒軌跡と考えられ, 他の砥粒よりも大きく切削に寄与していることが分かる.

研削量が約150 mm³程度になると交差する2方向の条痕が観察され, さらに研削量が400 mm³程度に達すると種々の方向をもった砥粒条痕が認められる. これは複数の砥粒が研削領域の同一点に対して同時に寄与し始めたことを意味し, 砥石表面の定常化と呼ぶことができるであろう.

砥石表面が比較的安定し, また研削性が良好と思われる研削中期(研削量150 mm³程度)における“4-2”パッ

チ研削の研削除去能率，設定切込みに対する実切込み，仕上面粗さ曲線を知るために，図5(b)に示すパッチ研削実験手順，すなわち前仕上面に対して目測と研削音からパッチ研削装置の z 軸位置決めを行い，NC指令テープにより設定切込み $10\mu\text{m}$ を与えた工具経路①に従い被削材を研削し，研削後原点に復帰し，次に工具経路②に従い，スパークアウト研削を行う。この場合，経路①と経路②は y 軸方向に 5mm ずれるようにしてあるため研削仕上面には図5(b)のA研削面が残るようにしてある。

同様な手順で設定切込み $20\mu\text{m}$ ，スパークアウト研削を繰返すことにより①設定切込み $10\mu\text{m}$ ，②その時のスパークアウト研削面，③設定切込み $20\mu\text{m}$ ，④その時のスパークアウト研削面を図5(b)のA, B, C, D面として得ることができる。

得られた研削面A, B, C, Dの x 軸方向断面粗さ曲線を図8に示す。なお用いた研削条件は3.1節の条件と同一である。

実験結果から設定切込み $10\mu\text{m}$ のトラベース研削においては実切込みは約 $5\mu\text{m}$ 程度で1回のスパークアウト研削を追加することによって設定切込み値に達することが確認された。また仕上面粗さはスパークアウト研削によって若干改善されるが，前仕上面の影響はほとんど受けないと言える。すなわち#80 CBN 電着砥石を用いた場合本実験条件下では常に仕上面粗さ $2\sim3\mu\text{m}$ 程度の面が得られることが分かった。

3.4 砥石，砥粒の摩耗とその時間的変化

“4-2”パッチ研削における砥石形状は図9に示すように特異な形状であって，また砥石の各部での砥粒運動が異なっているため，砥石，砥粒の摩耗は一様には進行せず各部によって異なると考えられる。

したがって図9に示す砥石の代表的部分①，②，③における砥石，砥粒の顕微鏡観察を通して，その摩耗進行状況を観察した。

すなわち実験条件は3.1節で述べた条件と同一とし，実験手順は，図5(b)に示すようにパ

(a) 研削量：60mm²

(b) 研削量：150mm²

(c) 研削量：400mm²

研削条件は図6に同じ

図7 “4-2”パッチ研削における仕上面性状の変化

研削条件

被削材：FC 25，砥石：#80 CBN 電着砥石，主軸回転数：2350 rpm，送り速度：50 mm/min，切込み d ： $10\mu\text{m} + (10\mu\text{m})$ ，研削油：灯油

(a)：切込み $10\mu\text{m}$ ，(b)：スパークアウト研削，(c)：切込み $20\mu\text{m}$ ，(d)：スパークアウト研削

図8 “4-2”パッチ研削における仕上面粗さと除去量

a: 研削量 0, b: 研削量 135 mm³

研削条件は図6に同じ

図9 “4-2” パッチ研削用 CBN 電着砥石の摩耗特性

a: 研削量 0, b: 研削量 135 mm³, L: 粗さ測定範囲, 測定間隔 30 μm

研削条件は図6に同じ

図10 CBN 電着砥石表面の立体粗さ線図による観察

ッチ研削装置を NC テープで繰返し駆動する方式をとり
工具駆動原点下に工具顕微鏡を設定し、切込みを 10 μm
単位で順次増加させることにより研削除去量 15, 30, 45,
75, 90, 105, 120, 135 mm³ における砥石表面の顕微鏡写

真を得た。図9はそれらの中で砥石の使用前と研削除去
量 135 mm³ 後の ①, ②, ③ 点における砥石表面性状の比
較写真であって、砥石先端部では砥粒の摩耗、脱落、切り
くずによる目づまりと思われる現象が観察される。

た砥石の②部分では外周に沿って先端部と同様に砥粒の摩耗、脱落が認められる。すなわちパッチ研削においては、砥石外周部における砥粒の切削作用が重要な役割を果たし、それに伴い砥石境界部の砥粒の摩耗、脱落が生じていると推察される。

砥石先端部における砥粒の脱落、摩耗現象を定量的に測定するため表面粗さ計を用いて $30\mu\text{m}$ 間隔で砥石表面の立体粗さ線図を求めたものを図 10 に示す。すなわち、図 10 は使用前、及び研削除去量 135 mm^3 時における #80 CBN 電着砥石の表面写真とそのときの立体粗さ線図を示したものである。

同図から明らかなように、使用前の砥石の外周部、特に先端部では電着による金属ボンドの盛上がりが見観察され、使用後は、外周部のだれ、砥粒の脱落及び砥粒間チップポケットへの切りくずによる目づまり現象が観察されるが、砥粒そのものの摩耗は立体粗さ線図から判断するかぎり顕著ではない。このことは目づまり現象の防止と、切りくずの除去を行えば、まだ CBN 電着砥石は十分な研削能力をもっていると考えられる。

3.5 任意境界形状を有する底面研削への応用

前節までに正方形パッチ研削装置の研削性能の実験的検討から正方形パッチ研削の実現が可能であることを明らかにした。

ここでは正方形パッチ研削装置を NC 立フライス盤に取付け、NC 指令テープで直角隅部をも含めた任意境界形状の底面研削実験について述べる。

正方形パッチ研削装置の駆動方式は、最初にパッチ研削装置の駆動原点を被削材中央部の中ぐり部内に設け、Z 軸方向の切込みを与え、つづいて図 11 (a) に示す要求輪郭形状にあう指令テープによってトラバース研削を行う。正方形パッチ研削装置は輪郭形状を 1 周した後、再び原点に復帰し、再度、切込みを加え、トラバース研削を実行する。

実験条件は、3.1 節で述べた条件と同じであるが、フットエンドミルにより仕上面粗さ $10\mu\text{m}$ 程度の前仕上面であるため、設定切込み $10\mu\text{m}$ の輪郭トラバース研

(a) パッチ研削装置駆動経路

(b) 研削加工例 (FC25)

図 11 “4-2” パッチ研削装置による任意境界形状底面研削加工例

削を 2 回繰返すことにより図 11 (b) に示すように直角隅部をも含めて一様に研削することが可能であることが分かった。

4. 結 論

“n-K”パッチ研削の中で実用的に重要であると考えられる“4-2”パッチ研削装置を試作し、限られた実験条件ではあるが研削実験を行い次の結論を得た。

- (1) “4-2”パッチ研削用砥石として鋼を母体にした CBN 電着砥石を用いることにより直角隅部をも含めた任意境界形状の底面研削が実験的に可能であることを確認した。
- (2) 直角隅部における研削加工形状精度は #80 CBN 電着砥石を用いた場合、直角隅部丸み半径が約 0.2 mm まで加工可能であることを明らかにした。
- (3) “4-2”パッチ研削における CBN 電着砥石の砥石、砥粒摩耗経路を顕微鏡写真、底面粗さ計を使用して、その特徴を明らかにした。

引 用 文 献

- 1) 岸浪建史ほか：パッチ研削装置の原理とその幾何学的特性，精密機械，45，4 (1979) 479.
- 2) 岡田昭次郎：研削砥石の性質と選び方，機械の研究，27，12 (1975) 1475.
- 3) N. D. Navarro: The Technical and Economic Aspects of Grinding Steel with Borazon Type II and Diamond, SME, MR 70-198, (1970) 1.