研削加工*

Grinding

稲崎一郎**
Ichiro INASAKI

砥粒を使用する機械加工技術は、人類が最も早くから手にした「ものづくり」手段の一つであるが、今日においても依然として各種の機械、電子部品の加工技術として重要な役割を演じている。切削加工に続いて行われる仕上げ加工技術としてだけでなく、高硬度材料の高効率加工技術として、また光学、電子部品の高品質表面加工技術として新たな展開も見せている。

1. 砥粒, 砥石

研削工具としての砥石は、その構成要素である砥粒、結合剤、気孔率の種類と構成割合、また構造の面で改良が図られている。1900年初頭のアランダム砥粒開発、1900年半ばの人造ダイヤモンド、cBN 砥粒の開発は研削加工に大きな変革を与えて今日に至っている。

1980 年半ばに実用化されたゾルゲル法で製造する微細な多結晶構造高硬度アルミナ砥粒は、その優れた研削性能で高い評価を得ている。微細な自生発刃作用、ドレッシングの容易性に加え、cBN などの超砥粒より安価な点が評価されている。各種砥粒の基本的性質である破碎性、硬度、靱性等、磨耗特性を測定する方法は存在するが、これらと砥石としての研削性能との相関は十分に把握されているとはいえない。

結合剤別に砥石を分類すると、ビトリファイドボンド、レジンボンド砥石などが伝統的であるが、超砥粒砥粒に対してはメタルボンド砥石も多用されている。自動車産業、航空機産業においては電着 cBN 砥石の適用が多い。その理由は、工具交換の容易性に加えて、120 m/s 以上での高速研削がマシニングセンタを使用して可能なことなどである。砥石結合度は研削性能に大きな影響をもつため、その値を定量的に測定することが必要である。伝統的な押し込み硬さ試験機のほかに、圧縮空気の入試験法、加振によるヤング率計測法などが提案されているが、もっとミクロ

な砥石結合度評価法として、個々の砥粒に力を加えての脱落、破壊強度を測定する方法も提案されている¹⁾。

砥石の組織あるいは気孔率は、研削液の供給と切屑の生成上重要な因子であり、確実な気孔の形成方法と定量的な測定方法が必要である。高い気孔率を達成するために、8:1 という高アスペクト比の砥粒が製造された²⁾。また、従来の均質な砥石構造とは異なり、幾つかの砥粒をクラスター状の塊にしてこれらを結合剤で結合した 2 重構造の砥石も開発された³⁾。このような構造にすることによって高い気孔率を達成することができ、研削比も向上した。

単層構造の砥石も広く普及した。多層構造の砥石より廉価であることに加えて、金属製のコアとすることによって高速回転に耐えることが特徴であるが、自生発刃が期待できないので研削性能の時間的変化が大きいのが弱点となる場合がある。ろう付け技術によって単層砥石を実用化するための研究開発が活発に進められた⁴⁾。砥粒を整列して配置することができ、電着砥石より砥粒を強固に保持し、チップポケットも大きくできる利点がある。反面、製造過程での高温のために超砥粒が劣化する可能性もある。

セグメント状の砥石片をフライス切れ刃のように配置した、ハイブリッド工具が提案された⁵⁾。このような構造とすることによって研削性能が向上し、研削液供給量の低減を図ることができた。縦軸平面研削盤やダブルディスク研削盤に使用される大型砥石の製作に関して、多数の円盤状ペレットに固めた砥石小片を配置する構造がその製造と研削性能の点で有利であることが示された。

砥石のハブは、砥石強度の面からだけではなく、びびり振動の抑制、研削液の供給、プロセス監視用センサの組み込みなどの点からも改良の提案が多くなされた。強度の点では複合材料を使用した超砥粒砥石が実用化された。超砥粒砥石は普通砥石より接触剛性が高く、自励振動が発生しやすいことが理論的な安定解析によって示されている⁶⁾。そこで、ハブの外周部に弾性変形しやすい部分を設けることによって振動抑制を図ることが提案された⁷⁾。研削液を確実に研削点に供給するために、供給孔や溝を設けた砥石ハブも提案された。研削加工プロセスを監視するために、各種のセンサをハブに組み込んだ砥石が主として研究用に開発された。最初の試みは、AE センサを超砥粒砥石のハブに組み込んだものである⁸⁾。その後、研削抵抗や温度を計測するセンサを組み込む試みへと発展した。センサを砥石に組み込む利点は、研削プロセスのみならずドレッシングプロセスの監視も可能となることである。

*原稿受付 平成 20 年 6 月 12 日

**正 会 員 中部大学総合工学研究所 (愛知県春日井市松本町 1200)

稲崎一郎

1969 年慶應義塾大学大学院博士課程修了。工学博士。1970 年アーヘン工科大学訪問研究員。1984 年慶應義塾大学理工学部教授。1990 年精密工学会理事。1998 年米国カリフォルニア大学バークレイ校客員教授。1999 年ハノーバ大学名

誉博士。2004 年 International Academy for Production Engineering (CIRP) 会長。2005 年 Society of Manufacturing Engineers; F.W. Taylor Research Medal。2005 年学術会議会員。2007 年慶應義塾大学名誉教授。中部大学教授総合工学研究所所長。現在に至る。研究分野は機械加工プロセス、工作機械。

2. 研削プロセス, 研削盤

研削加工において設定される重要な加工条件は砥石周速度 (研削速度), 加工物速度, そして切込み深さである。これら設定条件の増減と組み合わせによって, 各種の研削方式が発展した。研削速度の上昇は砥石強度と研削盤の性能向上によって高速研削として定着した。切込み深さを mm 単位まで大きく取り, 加工物速度を極端に遅くするクリープフィード研削は各種難削材量の加工に威力を発揮した。クリープフィード研削の条件は切屑断面積を小さくして砥粒の磨滅的摩耗を促進するため, 切れ味の劣化が進行しやすい。そこで砥石の切れ味を維持するために, 研削点とは反対の位置で連続的にドレッシングを行う連続ドレッシング研削も耐熱合金の加工に実用化された⁹⁾。研削盤としては砥石の自動交換装置を具備する必要がある。クリープフィード研削とは全く逆に, 切込み深さを小さくして加工物速度を高めた平面研削技術が難削材料の加工に有効であることが示され, スピードストローク研削として実用化された¹⁰⁾。テーブル駆動はリニアモータの搭載で高速化された。

砥石と研削盤の性能向上によって, 研削速度, 加工物速度, 切込み量をそれぞれ 250 m/s, 100 mm/s, 30 mm まで高めた研削が可能となり, 材料除去率の面で切削と競合するに至っている¹¹⁾。

研削プロセスとドレッシングプロセスに電気化学現象を重ねた各種の複合研削技術が試みられた。中でも ELID (Electrolytic in-process dressing) 研削は, わが国から生まれた独創的技術で, その有効性も実証された世界に誇れるものである¹²⁾。

環境負荷の低減を目指して, 機械加工の場で使用される加工液の量を低減しようとする試みが活発である。切削においては MQL (Minimal Quantity Lubrication) 切削としてすでに一部で実用化されている。研削においては, 潤滑機能をもった MoS₂ などの材料を砥石に組み込む特許が各種出されている¹³⁾が, 微細な切屑をいかに確実に排除できるかが実用化の上での鍵である。

研削プロセスの挙動を予測して, 適切な加工条件の設定を可能にすることを目的に計算機シミュレーションの研究が数多く行われた¹⁴⁾。計算機の著しい能力向上によって, 定量的にもある程度の予測が可能となった。各種のシミュレーション技術を比較する国際共同調査も行われた¹⁵⁾。

3. 萌芽的研究開発

特殊形状の研削砥石を少量製作する方法として, レーザを応用したラピッドプロトタイプングが提案された¹⁶⁾。超砥粒をハブの外周に規則正しく配列して接着し, 微小切刃のフライス工具として使用することも試みられている¹⁷⁾。シリコンインゴットからウエファを切りだす技術としては, 内周刃砥石に代わって遊離砥粒を用いたワイヤソーが用いられていたが, 加工環境改善を目的として鋼コアワイヤに砥粒を電着した方式が開発された¹⁸⁾。

研削加工において焼けの発生は重大なトラブルであるが, この熱エネルギーを鋼の焼き入れに利用することが試みられた¹⁹⁾。レジンボンドアルミナ砥石を用いて, 平面であれば最大 2mm の深さまで圧縮残留応力を残して焼き入れが可能であった。

人造ダイヤモンドや cBN に続く超砥粒の開発も進められている²⁰⁾。

参 考 文 献

- 1) F. Klocke and T. Merbecks: Characterization of Vittrified cBN Grinding Wheels, 4th Int. Machining and Grinding Conf., SME, Michigan, (2001).
- 2) M. Wu: Method for Making High Permeability Grinding Wheels, Norton Company, US Patent 5, 738, 696 (1998).
- 3) A. Booner: Filed October 2003, Abrasive Articles with Novel Structures and Methods for Grinding, World Patent 03/086702 A1.
- 4) A. Chattopadhyay and H. H. Intermann: On Performance of Brazed Single-Layer CBN Wheel, Annals of the CIRP, **43**, 1 (1994) 313-316.
- 5) T. Tawakoli: T-Tool—The New Superabrasive Tool System for Grinding and Dressing, SME, 5th International Grinding Conf., (1993).
- 6) I. Inasaki, B. Karpuschewski and H.S. Lee: Grinding Chatter—Origin and Suppression, Annals of the CIRP, **50**, 2 (2001) 515-534, Keynote paper.
- 7) R. Baylis, B. Stone: The Effect of Grinding Wheel Flexibility on Chatter, Annals of the CIRP, **38**, 1 (1989) 307-310.
- 8) M. Wakuda, I. Inasaki, K. Ogawa and M. Takahara: Monitoring of the Grinding Process with an AE Sensor Integrated CBN Wheel, Journal of Advanced Automation Technology, **5**, 4 (1993) 179-184.
- 9) I. Inasaki: Creep-Feed Grinding with Continuous Dressing, Annals of the CIRP, **36**, 1 (1987) 227-230.
- 10) C. Zeppenfeld and F. Klocke: Speed Stroke Grinding of Gamma-Titanium Aluminides, Annals of the CIRP, **55**, 1 (2006) 333-335.
- 11) P. Comley, D. Stephenson and J. Corbett: High Efficiency Deep Grinding and the Effect on Surface Integrity, Advances in Abrasive Technology VI, ISAAT., Conf. Bristol, UK, (2003) 207.
- 12) 大森整: ELID 研削加工技術, 工業調査会, (2000).
- 13) Noritake: Vittrified Abrasive Solid Mass Having Pores Filled with Resin and Solid Lubricant Agent, US Patent 6428587 (2001).
- 14) H.K. Toenshoff, J. Peters, I. Inasaki and T. Paul: Modeling and Simulation of Grinding Processes, Annals of the CIRP, **41**, 2 (1992) 677-688, Keynote paper.
- 15) E. Brinksmeier, J.C. Aurich, et al.: Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes, Annals of the CIRP, **41**, 2 (2006) 667.
- 16) V. Kovalevko, L. Golovko, et al.: Laser Technology Application for Diamond Tool Manufacturing, Proc. Int. Conf. Laser Technologies in Welding and Material Processing Kiev, (2003) 159.
- 17) J. Aurich, O. Braun, et al.: Development of a Superabrasive Grinding Wheel with Defined Grain Structure Using Kinematic Simulation, Annals of the CIRP, **52**, 1 (2003) 275.
- 18) M. Nakai, H. Ogawa, et al.: Development of a Fixed Diamond Saw for Electronics Applications, Advances in Abrasive Technology III, Soc. of Grinding Engineers Japan, 233 (2000).
- 19) E. Brinksmeier and T. Brockhoff: Utilization of Grinding Heat as a New Heat Treatment Process, Annals of the CIRP, **45**, 1 (1996) 283.
- 20) Y. Zhao, D. He, et al.: Novel Superhard Materials to Rival Diamond, Inertech, Vancouver, (2003).