

研削砥石による新規塑性加工法を用いた 表面テクスチャリングの研究

有明工業高等専門学校 創造工学科
教授 柳原 聖

(2018年度 一般研究開発助成 AF-2018021-B2)

キーワード：研削加工，超砥粒ホイール，テクスチャリング，梨地面

1. 研究の目的と背景

1.1 着想の背景

製品の質感や表面機能を付与向上させるためにシボ加工などの表面テクスチャリング手法は欠くことのできない加工技術である。

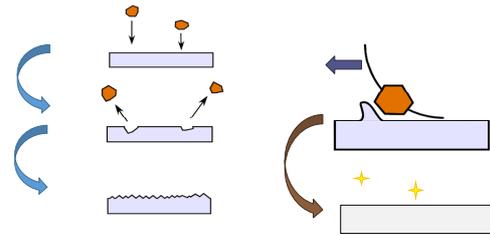
このような表面の処理においては、機械加工による成形工程終了後に表面に化学的なエッチング、レーザーによるアブレーション、硬質粒子や遊離砥粒のブラスティングが利用される。

しかし、これらの手法においては、マスキングの必要性や工作物材質の限定などそれぞれの手法に制約が生まれてしまう。工程集約による低コスト化を図るためには導電性などの工作物の材質への依存やマスキング処理の制約をうけない機械的作用による加工が望ましい。

一方、研削加工は、機械的作用による加工法の中で最終工程を担い、製品の寸法精度や表面品位に最も影響を及ぼす加工法である。その基本的な加工の様式は円盤あるいは円筒外周面上にアトランダムに配置された砥粒を、工作物の移動速度よりも10倍以上の速い速度で工作物に繰り返し接触させながら工作物の不要部分を除去し、可能な限り平滑な表面を創成してゆく。その目的は高効率の形状創成（体積除去）と無数の切れ刃の微細切込みによる表面の平滑化のみが現在の目的となっている。

ところが、近年は超砥粒ホイールというダイヤモンド等の超硬質粒子を砥粒に用いた極めて砥粒の保持力や耐磨耗性が高い工具が出現している。近々の工具においては、この工具をさらに一歩前進させるような考えの下で、砥粒の配置パターンを均一にした工具が実現されるようになってきた。

このように硬質粒子を強固な保持力での均質に配置した超砥粒ホイールは、工具に本来の目的である材料除去だけでなく、スタンピングやナーリングのような工具を工作物に押し付け、工作物表面を塑性変形させながら工具表面を転写することでテクスチャを形成させられる可能性がある。そのようなことが実現できればシボ加工のような微細なパターンングを任意の位置にしかも局所的に形成でき、工程の大幅な集約とフレキシビリティを実現できる可能性秘めている。



(a)ブラスティング (b)研削加工
図1 噴射加工と研削加工のメカニズム比較

1.2 本研究の目的

前記の背景のもとに、本研究においては、下記の項目を明らかにすることを目的とした。

1. 研削砥石（超砥粒ホイール）を利用して塑性加工を表面に生じさせ、自在に金属やセラミックス、そしてプラスチック等のシボ加工のようなテクスチャリングが実現できるのか？
2. 1で行うテクスチャリングは、マスキング等の前処理を不要にし、任意の位置で局所的に形成できるのか？
3. 研削加工からテクスチャリングまでシームレスに加工を可変させ、工程の集約や付加価値の製品付与が実現できるか？

以上の3項目に関して報告する。

2. 超砥粒ホイールによるテクスチャリング面（梨地面）の形成手法の検討

2.1 砥粒によるテクスチャリング面形成手法の検討

ブラスティング（噴射加工）においては図1(a)のように高圧のガスを利用して硬質の粒子に工作物に対してプ

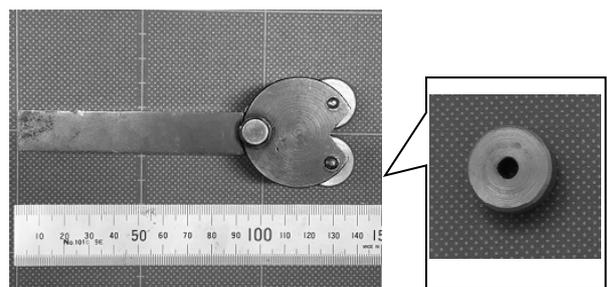


図2 加工メカニズム実証実験用工具

ランジ方向に運動エネルギーを与えて衝突させ、粒子を工具として工作物表面に押し込ませて塑性変形を誘起し無数の圧痕を形成させる。一方研削加工では円盤外周面に硬質粒子（工具）を固定させ、(b)のように工作物表面のトラバース方向（接線方向）に工作物をなぞるように高速移動させて表面を切削し光沢面を得ている。このような除去加工メカニズムを考慮すると、噴射加工のようなテクスチャリング面を研削加工工具で形成させるためには、工具と工作物間の運動においてトラバース運動を生じさせずに（トラバース方向の速度成分が零にする）工作物表面に対して工具が垂直に押し込まれる運動（プランジ運動）をさせる工具運動制御が必要となる。そこで図2のような工具を試作しテクスチャリング面が形成可能かどうかを試行した。



図3 加工メカニズム実証実験の様子

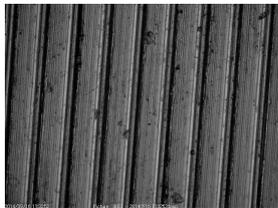


図4 供試材表面

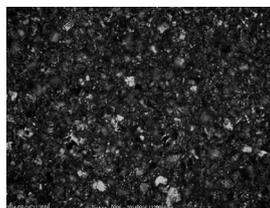


図5 加工後の表面

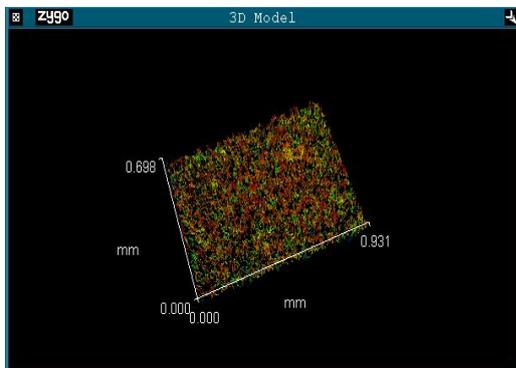


図6 加工後の表面の3Dトポグラフィ

2.2 連れ回り工具による基礎実験

図2はナーリング加工用の切削工具ホルダに電着砥石(#400)を取り付けたものである。この工具を図3のように旋盤に取り付け、アルミ合金(#2000)の工作物に押し当て、工具が連れ回り状態を起しトラバース速度成分が零になる状態を作った。すなわちナーリング加工と同様の加工形態を超砥粒ホイールで行うのである。この時の材料前加工面を図4に、加工後に得られた面を図5に示す。図4においては旋削仕上げによる加工条痕が明瞭に見ることができる。一方、図5では砥粒の圧痕によって旋削条痕がなくなっている。図6は得られた表面の3次元トポグラフィである。図から方向性のない凹凸面が得られており、加工された表面は梨地状テクスチャ面（梨地面）と言える。このことから、工具—工作物間の相対速度を零にして砥粒切れ刃のトラバース運動を生じさせないことで梨地面が得られることが明らかになった。表1は、異なる工作物の速度でどのような表面粗さRaが得られるかを調べたものである。工作物の速度が284m/min以下では工具の連れ回りが確認できたために梨地面形成が安定しており、表面粗さもほぼ等しい。しかし工作物速度が497m/minでは粗さが比較的好くない。これは工具の連れ回りが安定して生じておらず、工具—工作物間に砥粒の滑りが生じてしまいスクラッチが生じていたためであろうと考えられる。

表1 工作物回転速度と得られる梨地面の粗さ

	Work surface speed (m/min)	Average surface roughness Ra(μm)
Premachined surface		1.68
1	23	2.52
2	73	2.64
3	152	2.09
4	284	2.14
5	497	3.02

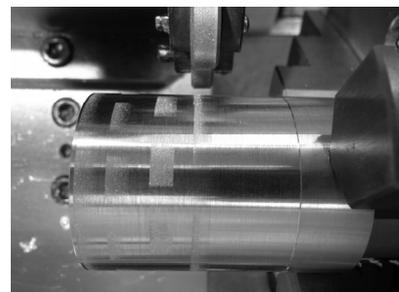


図7 マスキングフリー局所梨地加工実験

2.3 選択的な梨地面形成のための実験

超砥粒ホイールが梨地面などのテクスチャリング加工に応用できるとなれば、工作機械の工具送りの機構を利用して数値制御などで正確な工具位置決めが可能となり、テクスチャリングを施す面と施さない面を選択的にかつマスクングを施すことなく形成させられるかもしれない。そこで基礎実験用に開発した工具を用いて、円筒面上に選択的に梨地面を形成するのを試行した。(図7) 目論見通りに超砥粒ホイールを利用することで任意の位置にマスクングフリーでテクスチャリングが施せている。

3. 工具-工作物間相対速度制御フィードバックシステムによるテクスチャリング

前章で試みた固定砥粒加工工具による梨地加工のように、超砥粒ホイールを塑性加工工具的に使うとすれば通常の研削盤から一歩進んだ機械の構成が必要となる。たとえば前章の基礎実験においては工具と工作物との摩擦力に依存しながら工具を駆動し砥粒の押し込みを実現していた。しかし、摩擦力だけの駆動力では加工速度は低速にならざるを得ず、加工効率を向上させようとするには限界が生まれるであろう。

そこで次なるステップとしては、工具を能動的に駆動できるシステムが必要となる。この能動的な工具駆動においては、工具と工作物間の相対速度の把握が必要となるために、工作物の速度検出機能がセットになっていなければならない。必然的にインプロセスでの速度フィードバックによる研削工具のドライビングシステムを研削盤が実装する必要が生じる。

よって本章においては工作物の連れまわりではなく強制的な工具駆動方法により工具-工作物間の速度を制御できる基礎的な工具-工作物間速度フィードバックシステムを構築しながら表面テクスチャリングを試みる。

3.1 工具強制駆動による工具-工作物間フィードバック速度制御システムの構成

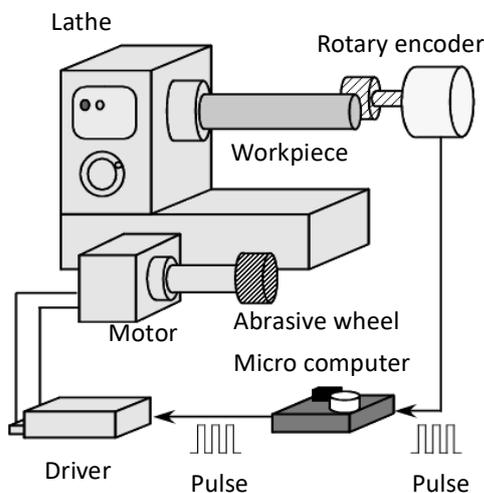


図8 工具強制駆動方式による実験装置

実験システムを図8に示す。このフィードバックシステムにおいては工作物の回転速度を検出するためにローラーを接触させる。ローラーにはロータリーエンコーダが取り付けられており、マイコンで工作物回転数を計測し、工作物の回転数に応じて等速あるいはある一定の速度差をもたせて工具をステッピングモータで回転させて駆動する。

工具である超砥粒ホイールは図9のようにステッピングモータの軸上に設置し、工作物に接触させることとした。今回は#400の電着砥石としている。なお、実験の範囲においては工具と工作物の接触力にともなうステッピングモータの脱調はなかった。

実験条件は、工作物速度を10.4m/minに設定し、速度差±10%の範囲で工具を工作物に接触させてどのような表面構造が形成されるかをマイクロSCOPEで観察した。

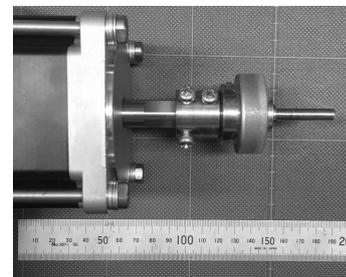
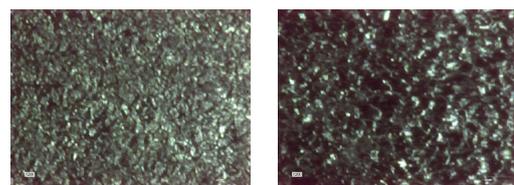


図9 駆動用ステッピングモータ

3.2 10%の相対速度が生じた場合の工作物表面

図10(a)は工具と工作物の速度を10.4m/minで接触させたときに得られた表面である。両者間の速度差がないため表面がこれまで同様の梨地面になっているのが確認できる。一方、図10(b)は工具速度を9.3m/minと約10%の速度差をもたせて工作物を加工したときのものになる。これまでのように表面が梨地面ではなく、鱗状の表面テクスチャに変化していた。

この結果から、工具、つまり砥粒切れ刃と工作物の速度差を能動的に制御することによって梨地面から新たな表面テクスチャを超砥粒ホイールで連続的に制御できることが示された。



(a) 速度差なし (b) 速度差 0.1m/min

図10 工具工作物間の速度差と表面性状

4. 工具-工作物間相対速度の動的制御のための超砥粒ホイールデザインについての検討

前章までに超砥粒ホイールと工作物の速度制御によって梨地面から鏡面までのシームレスな加工が、工具-工作物間相対速度の動的制御によって実現できる可能性が示されてきた。しかし現行の研削盤を使った加工プロセスにおいて工具速度、すなわちホイール回転速度を可変させる時の問題点としては、超砥粒ホイール本体が金属で作られているために慣性モーメントが大きく、スピンドル速度を動的に可変させてもホイール速度がその変化に追従できないことが想定されてきた。そこで本節においては低慣性モーメントのホイールデザインを検討したので、その効果について報告する。

4.1 デザインコンセプト

CBNホイールは表2の仕様のもをデザインベースとした。検討したデザインはTypeA, Bの2種類である。図11のTypeAは鉄道の動輪をイメージしたので、ベースデザイン1158gのホイールに対して491.2gと58%の重量削減を施したものになる。図12のTypeBは剛性を確保しつつ加工限界や遠心破壊の安全率を考慮しながらできる限りの軽量化にしたもので395.8g, 重量削減率66.7%までの軽量化を図ったものである。

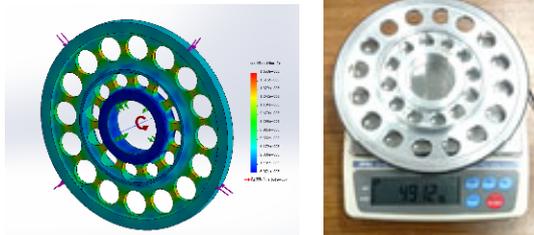


図11 TypeA ホイール (右) FEM解析結果 (左)

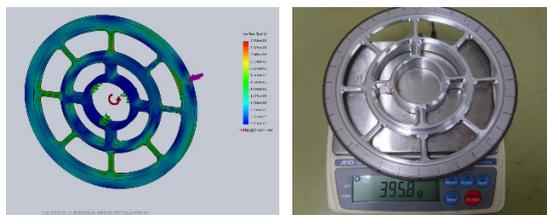


図12 TypeB ホイール (右) FEM解析結果 (左)

表2 デザイン検討用 CBN ホイールの基本仕様

Abrasive Spec.			CBC120N50BW4	
Shape	Wheel dia. [mm]	Wheel th. [mm]	Hole dia. [mm]	Layer th. [mm]
14A1	200	20	50.8	10.0

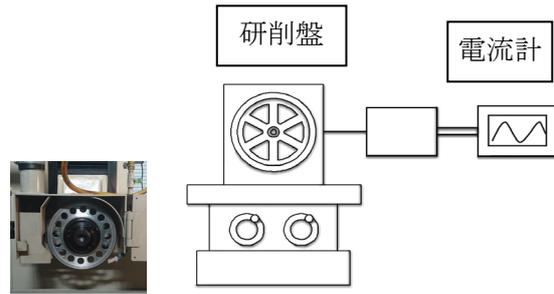


図13 研削盤装着状態と電流計測

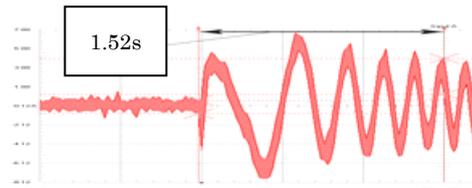


図14 モータ回転起動時の電流波形

A, B のそれぞれのデザインにおける FEM 解析条件は、材質をアルミニウム 2014 合金とし、中心軸穴固定、2000rpm 時の遠心力、法線研削抵抗 50N を設定した。最大応力は $3.386 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ で、砥石部下の薄くなっている部分に発生している。しかし、これはホイール素材の降伏強さ $9.651 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ を下回っており、安全率 28.5 であった。

4.2 砥石軸スタートアップ電流による軽量化効果の比較

ホイールの低慣性モーメント化の効果を知るため、平面研削盤にホイールを取り付け、砥石軸駆動モータ起動時のスタートアップ電流を計測した。(図13)

計測された電流波形の一例を図14に示す。回転を起動すると起動トルクをモータが発生させるために振幅および周波数が変化し、しだいに一定の値に収束する。収束したときが定常回転と認められる。よって、起動から周波数と振幅が定常になるまでの時間を標準デザイン、TypeA, TypeB と計測してまとめたものが表3である。

表3 スタートアップ試験結果

Type	Weight [g] After/Before	Reduction ratio [%]	Calculated Inertia [kg/m ²]	Acceleration time[s]
Normal	1158/1158	-	0.0057	4.72
Type A	491.2/1158	58	0.0025	1.52
Type B	395.8/1187	66.7	0.0020	1.52

表から A, B ともに慣性モーメントを削減した効果によって大幅に加速時間が短縮されており、ホイール加速時の電力削減がなされていることがわかる。その一方で、A の丸穴形状の場合と比較して B は重量削減率が大きいにもかかわらず加速時間は両者とも同程度となってしまっている。この理由としてはホイールではなく、フランジやベアリングなどの砥石軸の慣性モーメント自体が大きく、60%以上の軽量化を図ってもその効果が表れなくなっているためである。

5. 結論

本研究においては、研削砥石の塑性加工の利用法として超砥粒ホイールを利用した表面テクスチャリングの形成法を検討した。研削加工システムでブラस्टィングのようなことが実現できれば工具の位置決め制御によってテクスチャリングを施す面とそうでない面をマスクング処理なしで選択的に処理可能となり、また付帯設備もショットブラストのような遊離砥粒加工のように大型の高圧装置を用いないでできる可能性があるからである。得られた結果を下記に記す。

- (1) 基礎実験においては工作物に連れ回りする超砥粒ホイールを利用して、砥粒と工作物間における相対速度差を零に制御することによって、砥粒切れ刃が工作物表面をトラバースすることなく工作物に圧痕を生じさせて梨地状テクスチャ面が形成できることが示された。
- (2) 超砥粒ホイールによるテクスチャリング面形成においては工作機械の位置決め装置が利用できるために局所的な梨地面形成が工作物表面に選択的に可能となり、マスクング処理や高圧装置等の付帯設備が不要であることが示された。
- (3) 工具と工作物間の相対速度差を 10%に保つことで鱗状の表面テクスチャが得られた。このことより砥粒切れ刃と工作物の速度差を能動的に制御することによって梨地面から新たな表面テクスチャを連続的に制御できる可能性を示唆している。
- (4) 低慣性モーメントのホイールデザインを 2 種類提案し、重量削減率で概ね 70%の超低慣性モーメントの超砥粒ホイールが達成できた。
- (5) 電力削減と回転速度制御に対する応答性の向上の確認ができた一方で、砥石軸まわりの慣性モーメントのほうが大きいために軽量化効果には一定の限度があることが分かった。

6. 現在の研究展開

6.1 梨地成形面の射出成型金型への適用の可能性

固定砥粒加工工具によるテクスチャリング面を金型加工に実装することを目的として、射出成型を見立てた実験をした。ここでは梨地加工を施したスタンプを作成しこのスタンプを金型としてアクリル樹脂に加熱しながら押し付けた。得られた面を図 15 に示す。テクスチャリングの

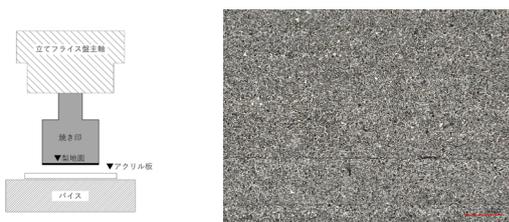


図 15 アクリル樹脂へのスタンプ実験(右転写面)

転写が確認できた。

6.2 摺動における油だまりとしての梨地成形面の可能性

本研究助成の表彰式において静岡大学の早川邦夫教授と固定砥粒加工工具で得られたテクスチャ面の実装について意見交換をする機会を得た。そのときの議論をもとに現在内燃機関の内部抵抗削減する研究を展開している。

(図 16) 成果については 2021 年度の日本機械学会九州学生会卒業研究発表会にて学生が発表をし、工作機械技術振興奨励賞を受賞した。予期せぬ朝報に本当に驚くことしきりであったが、今回の助成が我々の研究の飛躍のきっかけとなったことは間違いなく。心より感謝する次第である。

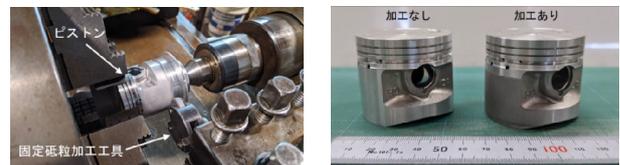


図 16 ピストンスカート部への実施例

参考文献

- (1) たとえば、産業工芸試験所技術第一部、梨地仕上げについて。
- (2) たとえば、特開 2011-212820。
- (3) 固定砥粒加工工具による梨地面創成法の開発 (アクティブフィードバックによる速度制御系の適用)、喜多 亮氏、柳原 聖、日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集 [2016. 9. 11-14, 福岡], S1310204, 査読無, 2016。
- (4) 局所的梨地加工面加工用工具およびその加工法、柳原 聖、特許公開 2016-147369。
- (5) 固定砥粒加工工具による局所的梨地面創成法の開発、喜多亮氏、師岡昂平、柳原 聖、精密工学会九州支部飯塚地方講演会第 16 回学生研究発表会講演論文集, p. 138。
- (6) 固定砥粒加工工具による梨地面創成法の開発、喜多亮氏、柳原 聖、日本機械学会年次大会講演論文集 [2015. 9. 13-16] (DVD-ROM), S1340103。
この助成を利用した文献
- (7) Hiroki Kakoi, Kiyoshi Yanagihara, Koji Akashi, Kensuke Tsuchiya, Development of Vertical Articulated Robot Deburring System by Using Sensor Feedback, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 886 1 - 4 2020。
- (8) 柳原聖、野原和人、軽量高剛性超砥粒ホイールのデザイン研究、日本機械学会2018年度年次大会講演論文集, S1320106。