

常温下の微視的塑性変形に基づくガラスの新規加工法 「延性モードピーニング」の開発とそれを用いた ハスの葉模倣構造創製

東京都市大学 理工学部 機械工学科 亀山雄高

Development of “Ductile-mode Peening” for Precise Glass Processing Based on
Microscopic Plastic Deformation at Room Temperature, and its Application
for the Fabrication of a Lotus-leaf-inspired Structure

Yutaka Kameyama
Department of Mechanical Engineering, Tokyo City University

ガラスを常温下で微小に塑性変形させることで表面改質を行うことが可能な「延性モードピーニング」を開発するとともに、それを用いた粉体付着防止効果について検討を加えた。通常のピーニングをガラスに施した場合、ガラスは脆性的なメカニズムで加工され、粗大な凹凸が形成される。これに対し、投射角度を浅く設定してピーニング加工を行うと、衝突した粒子はガラスを延性的に変形させるようになった。このような微細塑性変形は、ガラス表面に残された加工痕の深さが概ね 100 nm 以下程度である場合に生じた。このような延性的な加工痕は、窪みと凸部とからなるという特徴を示した。また、このような延性的な加工メカニズムが発現する条件の範囲内では、微粒子がガラス表面へ移着することによってできた突起構造や、ガラス最表層のごく浅い領域が広範囲に塑性流動したことを示唆する舌状の凹凸構造が形成される場合もあり、ガラス表面に多様な表面テクスチャを形成できる可能性が示された。粉体付着性評価の結果、ガラス表面に適切なテクスチャを創製することで、粉体付着を妨げられることが明らかとなった。粉体と比べて小さな間隔で凸部が配列している場合、粉体がテクスチャ凸部によって支持された結果、真実接触面積が減少したことがその要因であると結論付けた。

A novel surface modification technique for glass, referred to as “ductile-mode peening”, was developed that aims to induce microscopic plastic deformation in glass at room temperature. Its advantages in suppressing powder adhesion were explored. While conventional peening processes glass surface in a brittle manner, resulting in roughing the surface, peening under shallow peening angle induces ductile deformation in the glass surface. Such microscopic plastic deformation was observed when the depth of the collision dent formed by an individual particle remaining on the glass surface was approximately 100 nm or less. These ductile-mode dents were characterized by surface features consisting of both depressions and protrusions. Furthermore, within the range of processing conditions under which this ductile deformation mechanism emerged, protruding structures formed by the transfer of fine particles onto the glass surface were sometimes observed, as well as tongue-like structures suggesting plastic flow in a very shallow surface layer of the glass. These results indicate the potential for fabricating a variety of surface textures on glass surfaces through ductile-mode peening. Evaluation of powder adhesion revealed that powder attachment can be effectively suppressed by fabricating appropriate surface textures on the glass surface. When protrusions are arranged at spacings smaller than the particle size, the powder particles are supported by the surface protrusions, leading to a reduction in the true contact area. This reduction was concluded to be the primary factor responsible for the observed suppression of powder adhesion.

1. はじめに

近年, 様々な材料の表面に微細な凹凸を形成することを通して様々な有益な機能を実現する『テクスチャリング加工』が注目を浴びている. テクスチャリング加工の一つとして挙げられる微粒子ピーニングは, 微粒子を噴射し材料へ衝突させることによって加工を行うものである. 本手法を用いて金属材料へテクスチャリング加工を施すことで, 摩擦係数の低減¹⁾, 親疎水性の制御²⁾, 粉体汚れの付着抑制³⁾や, 生体適合性の向上など様々な効果を実現できることが, これまでの研究から明らかになっている. これは, 金属材料では微粒子ピーニングの加工条件に応じて様々な微細凹凸構造を作り分けられることによる.

しかしながら, ガラス材に対して微粒子ピーニングを施した場合には, 専ら表面が削り取られる作用が生じる. 凹凸は形成されるが, これはいわゆる曇りガラスを創製しているのと同じことであり, 透過性は損なわれてしまう. また, 凹凸構造を作り分けることも困難である. これは, 脆性材料であるガラス材の場合には, 微粒子の衝突に伴ってガラス表面で微小な脆性破壊が生じることで加工がなされるという原理に起因した問題である. すなわち, 塑性変形により形成される微細凹凸は粒子の衝突条件に応じて変化するのに対し, 脆性破壊ではそのような緻密な制御が難しい.

ところで, 切削加工や研削加工の分野では, ガラスやセラミクスなどの脆性材料であっても, せん断塑性変形を伴った切りくずが生成される場合があることが知られている⁴⁾. この現象は工具の接触面で圧縮応力が作用した状態かつ切込み深さがサブミクロン～ナノメートルスケールである条件で加工を行った場合に認められる現象であり, 精密加工の分野では, 脆性材料の延性モード加工と呼ばれている. 本研究ではここから着想を得て, 粒子が表面に対しごく浅い深さまでしか食い込まない条件で微粒子ピーニングを施せば, 被加工物が脆性材料のガラスであっても延性的なメカニズムすなわち塑性変形に基づく表面加工が可能なのではないかという仮説を立てた.

これを踏まえ本研究では, “常温下でガラスを塑性変形させる”という, 従来の常識を覆すユニークな微粒子ピーニングである「延性モードピーニング」を開発することを第一の目的とした. さらに, 延性的な変形というメカニズムに司られた加工を行うことで, ガラス表面に様々な表面凹凸構造を作り分けられるかどうかという点についても模索した.

前述した精密工学分野の知見を参考に考えると, ガラスが延性的なメカニズムで加工できるのは, 粒子の食い込み深さがサブミクロン～ナノメートルスケールの大きさの場合であると考えられ, 形成される凹凸も, おのずと小さいものになることが想定される. そのため, 透過性についても維持される可能性がある. このような特長を鑑み, ガラスの延性モードピーニングの応用として, 太陽電池パネルの汚れ付着防止を想定した. 供用中の太陽電池パネルの表面には, 砂塵などの堆積によって太陽光の入射が妨げられ, 発電効率が低下することが問題となっている. テクスチャリング加工によって, 粉体の付着防止を図れば, その解決策として有益と考えられる. そこで, 延性モードピーニングを施したガラス表面に対して粉体付着防止性能を評価する実験も行った.

2. 実験方法

本研究ではソーダライムガラス板を供試材とし, 納入状態のまま FPP を施した. FPP では加工条件を系統的に変化させ, まずはガラスに延性的な加工が行われる要件を明らかにするとともに, 本研究で目指すようなより複雑なテクスチャリングにつながる加工条件を探索することを目指した. 具体的には, FPP の粒子には形状・寸法・硬さが異なる 4 種類の粒子, すなわち, グリット状ホワイトアルミナ粒子 (粒径およそ 110 μm , 以下 GA 粒子), 球状アルミナ粒子 (粒径およそ 130 μm , 以下 SA 粒子), 球状ジルコニア系セラミクス粒子 (粒径およそ 100 μm , 45 μm , 5 μm の 3 種類, 以下 Z 粒子, MZ 粒子および FZ 粒子) を用いた. 投射角度は 3.5°, 15°, 90°の 3 通りに設定し, 投射圧力は 0.1 MPa か

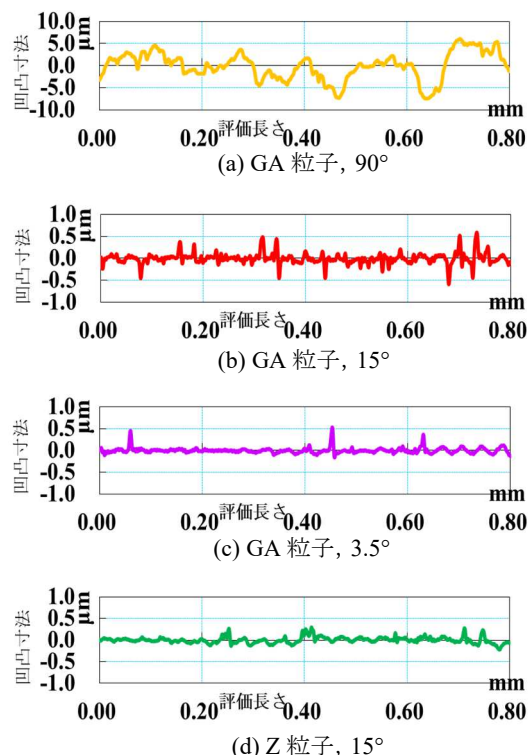
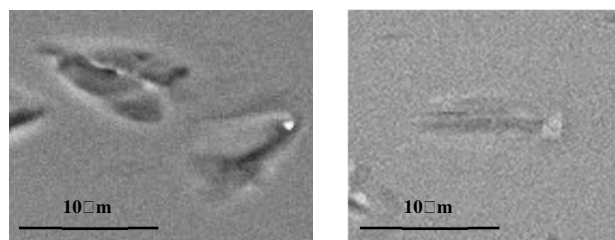


図 1 微粒子ピーニング加工面の断面曲線
文献 5 より一部抜粋転載



(a) へき開状の痕 (b) 隆起部を伴う痕

図 2 加工面に観察された粒子衝突痕の例
文献 5 より一部抜粋転載

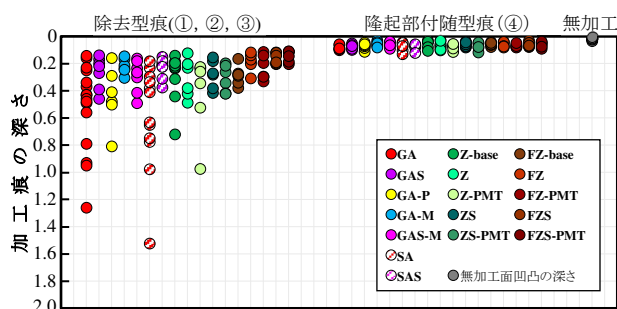


図 3 粒子衝突痕の形態と深さの関係
文献 5 より転載

ら 0.4 MPa の範囲で変化させ、また投射時間は 30 s、60 s の二通りで設定した。

また、FPP 加工面および比較対象としての未加工面に対して、以下に示す手順で粉体付着性の評価を行い、これをもって防汚性能の指標とした。作製した試験片に対し、二種類の試験粉体すなわち Si（代表寸法約 110 μm ）と SiO₂（代表寸法約 180 μm ）の 1.0 g を試験片に散布した。そののち試験片を静かに 90°傾け、重力により試験粉体を試験片表面から脱離させた。この時に試験片上に残った粉体の面積率を画像処理によって求めた。この面積率が低ければ、粉体が付着しにくい、あるいは脱離しやすい性質を備えていると評価できる。粉体の保管を含む一連の試験操作は、大気中水分による液架橋力の影響を小さくするため、シリカゲルによって湿度 20%から 30%の間に保たれたグローブボックス内で行った。

3. 実験結果および考察

投射角度と粒子の種類を変化させて微粒子ピーニングを施した表面の断面曲線を図 1 に示す。投射角度を 90°とした場合、同図(a)に示すとおり最大で 10 μm 弱の凹凸がガラス表面に形成された。同図(b), (c)は投射角度が浅い場合の結果で、平滑面に突起と窪みが点在するような凹凸構造となっている。凹凸の寸法は 90°投射の場合のおよそ 1/10 にあたる、1 μm 弱であった。凹凸の分布は、投射角度が小さい場合に、より疎となった。また、投射角度が同一である場合には、球状の粒子を用いたほう（同図(d)）が形成された凹凸は小さかった。これらの凹凸についてより詳しく観察した結果が図 2 である。脆性的なへき開を示唆する様相の粒子衝突痕も観察された(同図(a))が、一部の痕はその周囲に隆起部を伴い、へき開やき裂発生の様子が認められない特徴を示している(同図(b))ことが明らかとなった。このような特徴は、浅い角度から粒子が衝突したことで、被加工物が脆性材料のガラスであるにもかかわらず、粒子が材料を掘り起こすようにして塑性変形を生じせしめた可能性を示すものである。図 3 は、これら個々の加工痕の深さをレーザー顕微鏡で計測した結果を加工痕の特徴ごとに分類して整理したものである。同図中の「隆起部

付随型痕」が、図 2(b)に示したような変形によって形成された痕に相当する。これらの痕の深さは、およそ 100 nm かそれ以下の範囲に分布しており、それよりも顕著に深いものは認められなかった。これに対し、脆性的な様相を呈した痕の深さは、100 nm よりも大きい範囲で分布していた。つまり、粒子衝突痕の形態的特徴は、粒子の材料への食い込んだ深さが 100 nm を境として変化したといえる。さてここで、今回用いたガラスは、押し込み深さを漸増させながらスクラッチ試験を行うと、押し込み深さが 50 nm 前後でき裂が発生することが判っている。このき裂発生閾値となる押し込み深さは、痕形態の推移が生じた粒子の食い込み深さと概ねオーダーが一致したとみてよいであろう。つまり、隆起部付随型痕（の多く）は、ガラスが延性的な挙動を示しうる範囲内での変形によって形成されたものであった可能性が大きい。このことから、粒子の食い込みがガラスの延性脆性遷移点を下回る範囲内となるように投射角度を選定することによって、ガラスを延性的にピーニング加工できることが明らかとなった。以降ではこれを踏まえ、浅い投射角度（本研究で明らかにした範囲では、15°以下）でガラスへピーニングを行うことを、延性モードピーニングと称することとする。なお、延性モードピーニングを施した表面は、形成された凹凸が極めて微細であることから、透過率にはほとんど影響が及ばないこともわかっている。

延性モードピーニングを施した場合には、加工条件に応じてさらに特異的な表面構造が形成される場合も認められた。例えば図 4 は、粒径が中程度である MZ 粒子を用いて微粒子ピーニングを施した表面の観察結果である。延性的なメカニズムによって形成された加工痕が散布的に認められる(その数例を矢印で指示した)のに加えて、点上の突起が分布している様子が観察された。同図の断面曲線より、これらの突起の高さは 100～200 nm 程度であることがわかる。形状的特徴から、投射した粒子のうち粒径がとくに微細なもの、あるいは粒子が破砕した断片が、ガラス表面へ移着した状態であったものと考えられる。また、図 5 は、同じく MZ 粒子を用いて微粒子ピーニングを施した場合に形成された表面の様子であり、特異的な舌状の凹凸構造が観察されている。このような凹凸は、粒子衝突によってガラス最表面が顕著に塑性流動したことを示唆するものである。金属材料の場合には、このような塑性流動が集積されると、粒子の流れの向きと直行した連続的な山と谷が繰り返し出現する微細周期構造が形成される⁷⁾。ガラスの場合であっても、それと近い現象が起きていたことが示唆される。このような舌状構造は、投射距離を小さく設定した場合に認められる頻度が高かった。このように、延性モードピーニング加工では、単に粒子の衝突痕が点的に形成されるだけにはとどまらず、周期的な構造が形成されたり、あるいは粒子の移着に伴う凹凸形態の変化をも生じる可能性があり、条件次第で様々な表面テクスチャを形成可能であることがわかった。

図 6 に、さまざまな条件で微粒子ピーニングを行って作製した試験片に対し、Si 粉体と SiO₂ 粉体を用いて粉体付着試験を行った結果を示す。同一の試験片に対し、複数回条

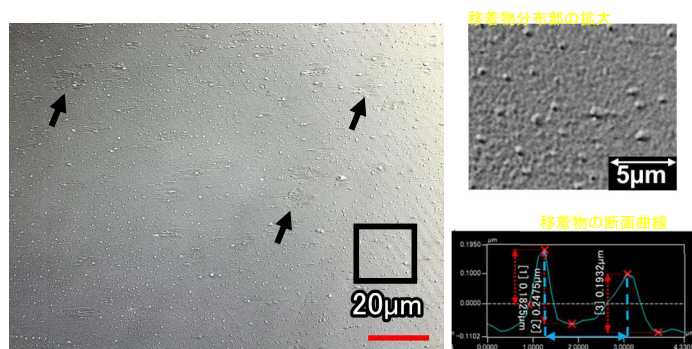


図 4 延性的な痕(図中矢印)と粒子移着物からなる加工面の様子 文献 6 より転載

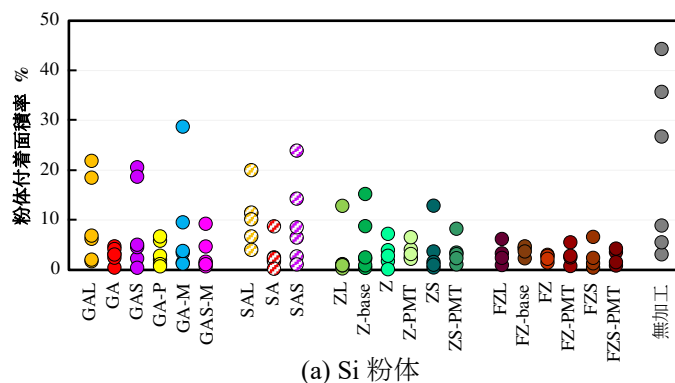


図 5 舌状の凹凸構造を呈する加工面の様子

件での試験を実施し、それぞれの試行で得られた粉体付着面積率を各プロットが表している。図中の横軸はピーニング条件の種別を表すが、その詳細は文献に譲る。まず、Si 粉体の付着試験結果は、無加工表面、GA 粒子と SA 粒子を用いて加工した各試験片では、試験を複数回実施すると、付着面積率が 20~40%と比較的高い値を示すことがあった。このような結果は、付着した粉体が比較的表面へ留まりやすいことを意味しており、粉体付着防止という観点では好ましくない。これに対し、Z 粒子と FZ 粒子を用いた各試験片については、完全に粗面化した投射角度 90°の条件、延性モードピーニングとなる条件のいずれも、安定的に 10%未満の粉体付着率が計測された。これは、Z 粒子と FZ 粒子を用いたピーニング加工で作製したテクスチャが、他の表面と比べて Si 粉体を離脱させやすい、言い換えれば Si 粉体の付着を妨げやすい効果を有していることを意味している。

一方、同図(b)に示す SiO₂ 粉体の付着試験については、無加工表面の場合に付着面積率が比較的高い範囲で結果がばらつき。それ以外は微粒子ピーニングの条件に関わらず 20%以下の付着面積率を示した。ピーニング条件の違いによる SiO₂ 粉体付着率の差は明瞭には認められなかった。以上の結果より、テクスチャを有するガラス表面は、今回実験した範囲では総じて平滑面よりも SiO₂ 粉体の付着を妨げやすいことが示唆された。

各テクスチャ面が示した粉体付着挙動について図 7 をもとに考察する。同図は、微粒子ピーニング加工面に形成された凸部の間隔を示しており、図中水平な線は、粉体付着試験に供した Si 粉末と SiO₂ 粉末それぞれの代表寸法を表している。この凸部間隔は、レーザー顕微鏡によって測定した。延性モードピーニングとなる各条件では、テクスチャの高さ方向寸法も微細であるが、テクスチャ凸部の隣接間隔も比較的低く、150 μm 以下である場合が多かった。ただし、一部のピーニング条件、具体的にはグリット状アルミナ粒子を用いて投射角度が小さい GAS、同じ粒子で投射質量が少ない GA-M、球状アルミナ粒子を用いて投射角度が小さい SAS の各試験片では、凸部の平均間隔がそれよりも大きい場合があった。これらの比較的凸部隣接間隔が広がった試験片は、付着面積率がやや高い範囲にまで分布していたことが図 6 より読み取れる。反対に、粉体付着面積率が安定的に



(a) Si 粉体

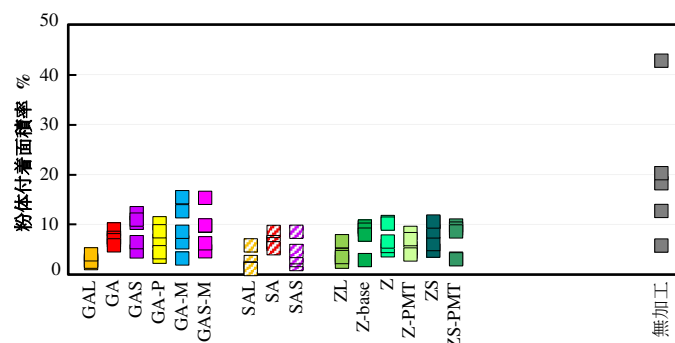
(b) SiO₂ 粉体

図 6 ガラス試験片に対する粉体の付着性評価結果
文献 5 より記載

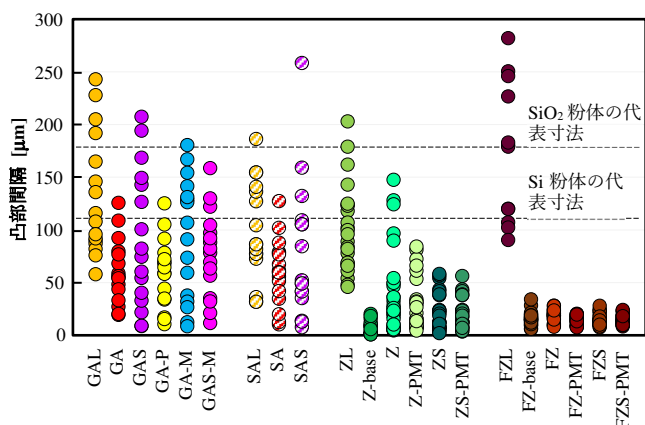


図 7 テクスチャを有する試験片における凸部の間隔
文献 5 より転載

低かった各試験片は、多くの場合にテクスチャ凸部隣接間隔が Si 粉体の代表寸法と比べて短かった。つぎに、各試験片での凸部平均間隔は、延性モードピーニングによる加工面のほとんどで SiO₂ 粉体の代表寸法を下回った。前述の通り、延性モードピーニング加工面が示した SiO₂ 粉体の付着面積率は、ピーニング条件に関わらず、安定的に低い値を示していた。以上の結果を総合すると、ピーニングによってガラス表面に形成された凹凸の凸部の隣接間隔が粉体寸法と同程度かそれ以下程度で並んでいる場合には粉体付着面積率が低くなる傾向があること、反対に凸部間隔が粉体寸法以上の間隔を取る場合には粉体付着面積率が高くなる傾向があることが見出された。粉体より寸法よりも短い間隔で凸部が配列したテクスチャ面では、粉体は凸部に支持されるようにして表面に付着すると考えられるため、粉体と材料との真実接触面積低減を通して粉体と材料の付着をもたらすファンデルワールス力が減少するはずである。その結果、粉体付着防止効果が発現したものと考えられる。反対に、凸部が疎に配列している場合には、その間の平坦な部位へ粉体が入り込みうる。その結果、粉体と材料との間に働くファンデルワールス力も大きくなり、粉体が脱離しにくくなったものと推察される。

4. 結論

適切な条件下でピーニング加工を施すことにより、ガラスを延性的なメカニズムで加工し、防汚機能を示すテクスチャを形成できることを明らかにした。この知見は、ブラスト加工をはじめとする従来の噴射加工技術の常識を覆すものであり、ガラスを表面改質する新たな原理としての活用が期待できるものといえる。

5. 謝辞

本研究は、公益財団法人日本板硝子材料工学助成会研究助成を受けて実施されたことを記し、関係各位に深謝の意を表する。

6. 参考文献

- 1) Y.Kameyama, et.al.; Tribol. Int., 78 (2014) 115.
- 2) Y.Kameyama, et.al.; Int. J. Automation Technol., 13, 6 (2019) 765.
- 3) H.Suzumoto, et.al.; Int. J. Abrasive Technol., 11, 3 (2023) 184.
- 4) T.G.Bifano, et.al.; ASME. J. Eng. Ind., 113, 2 (1991), 184.
- 5) 川合邑佳, 亀山雄高ほか; 砥粒加工学会誌, 69, 4 (2025) 208. *
- 6) H.Tagaya, Y.Kameyama, et.al.; Proceedings of ICSP15 (2025) *
- 7) Y.Kameyama, et.al.; CIRP Annals - Manufacturing Technology, 64, 1 (2015) 549.

* 付は本助成の成果に関する公刊論文