タービンエンジンにおける複雑形状部品の
高品質な表面改質層創成

東京科学大学　工学院　機械系　機械コース
助教　朱　疆
（2023 年度 一般研究開発助成 AF-2023004-B2）

キーワード：バニシング加工，表面改質，表面強化，薄肉部品，自由曲面

１．研究の背景と目的

バニシング加工は，高硬度工具を用いて材料表面の微細な凹凸を塑性変形させることで，表面粗さの低減とともに，疲労強度，耐摩耗性，耐食性などの機械的特性を同時に向上させることが可能な表面改質手法である．そのため，自動車，船舶，航空機など高い信頼性が要求される構造部品の分野において注目されている．

一方で，従来のバニシング加工は，円筒面や平面などの比較的単純な形状や，剛性の高い厚肉部品を主な対象としており，タービンブレードのような自由曲面を有する複雑形状部品や，薄肉部材への適用は困難である．特に，薄肉部材に対しては，加工時に工具押し付け力に起因する変形が生じやすく，高品質な表面改質層の創成を阻害する要因となっている．

申請者はこれまでに，材料の両面から荷重を付与することで，加工時の変形を抑制可能なバニシング工具を開発し，薄板材料に対する表面改質の可能性を示してきた．さらに，多軸制御と組み合わせることで，自由曲面形状への適用を見据えた加工手法の検討を進めている．

本研究では，上記の課題を踏まえ，タービンエンジンに用いられる複雑形状薄肉部品を対象として，両面から荷重を付与可能なバニシング加工と多軸制御を統合した加工システムを適用し，高品質な表面改質層の創成を目的とする．特に，薄肉部材における加工変形の抑制と，表面粗さ，硬度，残留応力といった表面特性の改善との両立を図るとともに，自由曲面形状に対する適用性を明らかにすることを目的とする．

２．実験機器と加工法

本研究では，薄肉材のバニシング加工が可能な工具（図1）を開発し，開発した工具を用いて薄板チタン合金 Ti-6Al-4V（以下 Ti64）に及ぼすバニシング加工の影響を調査した．

当該工具の特徴として，以下が挙げられる．

1)　工作物の両側から荷重を与えるシステム

2)　油圧を利用した低塑性バニシング構造

1)は工具を利用して両側から均等に力を加えることにより，材料を曲げようとする力を互いにキャンセルし，薄板の変形を抑制する．実際に 1 mm 厚の SUS304 薄板に対する 100 N および 200 N でのバニシングの結果を図 2 に示す．

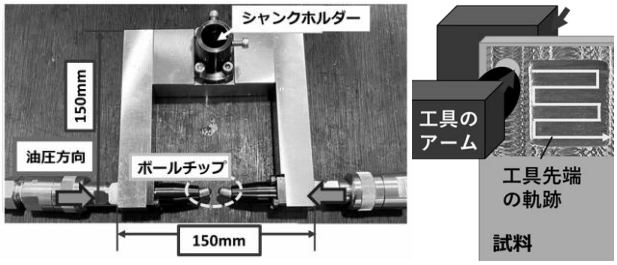


図 1　開発した工具と加工方法

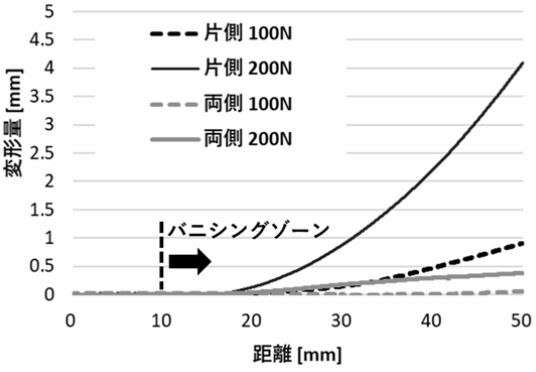


図 2　片側加工と両側加工の変形量

当該工具を利用した両面加工によって，加工後の薄板の変形量を従来の加工法である片面のみの加工時の 10%ほどに抑制することが確認できる．

2)の低塑性バニシングはボールが加圧した流体で支持されることによって一定のバニシング圧力でワーク表面を加工することができる．プロセス中，この自由転がりボールは常にワークに対する一点接触を可能にし，せん断応力の影響なしに任意の経路に移動したり任意の方向に転がったりする．ボールを支持する流体は加工中の摩擦の発生を抑える役割も果たすため，材料表面層の剥離を抑制することができる．

図 1 にも示すように、加工は工具を往復走査線状に動かすことで，薄板材の表面と裏面を同時に処理した．工具先端球は直径 6 mm，最大硬度 830 HV で，送り速度 1500 mm/min で加工する．また実際の製造工程を再現するため，使用する薄板試料の表面にはフライスによる前加工を施している．

３．表面特性の改善効果

3・1　表面粗さの評価

図 3，図 4 に 2 ㎜厚の Ti64 をバニシング加工した後の表面粗さを示す．触針式粗さ測定器(DSF600，小坂研究所)にて 10 ㎜分の線粗さを算術平均粗さ Ra で計測した．いずれも切削によって準備した前加工粗さを“Milling”で示し，3 回の測定の平均を算出している．

図 3 は材料の裏表を対象に，送り方向に垂直（⊥）と平行（//）に測定したもの，またステップ幅を変えたものを評価している．バニシング力は 100 N で一律である．結果から，いずれの条件でもバニシングにより粗さが大きく改善されていることがわかる．両面とも同じ条件で加工されるため，前加工粗さによるばらつきの影響を考慮すると，裏表での差異もわずかであるとみなせる．ステップ幅 0.03 ㎜での計測方向の違いからは，平行方向よりも垂直方向の粗さが大きい結果となった．塑性流動の方向と一致する平行方向に対し，垂直方向の測定では，往復走査線に形成された多数のステップを通過することになる．そのためステップごとの溝の影響が顕著に現れた結果である．ステップ幅の違いからは，全体として幅の増加に伴って粗さも増加する傾向にある．特に 0.1 ㎜，0.2 ㎜ではその差が大きい．表面は転がり接触によってできた線状痕が繰り返し転写されることで平滑化されるため，通常その間隔が狭いほど滑らかな面が得られる．しかしながら，ある程度の狭さになると平滑可能な凹凸がなくなり，改善の効果が停滞する．また各ステップの間隔が狭すぎると，多数の溝形成による悪化や，間隔に比例した加工時間の低下が懸念されることとなる．

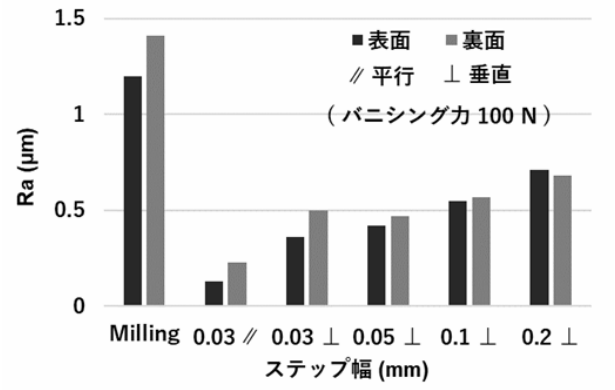


図 3　ステップ幅と送り方向の表面粗さへの影響

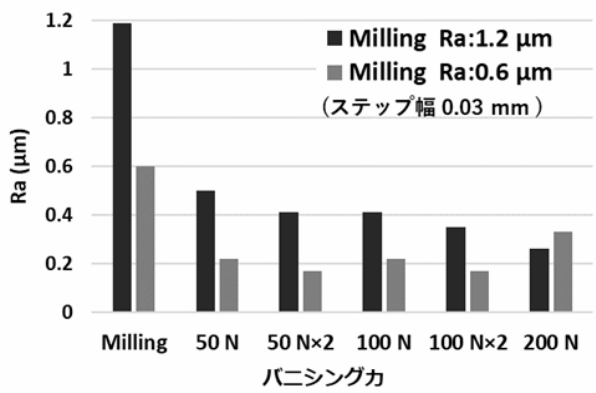


図 4　加工回数とバニシング力の表面粗さへの影響

図 4 は前加工粗さが大きく異なる面に対して，バニシング力とバニシング回数を変えた時の状態を評価している．測定方向は図 3 で確認された工具の押し込みによる溝の影響も考慮するため，送りに垂直な方向を見ている．また，ステップ幅は 0.03 ㎜で一律である．結果として，前加工粗さの大小とバニシング後の数値には一定の相関が見られる．また，前加工粗さが高いとバニシング力の増加に伴い表面粗さが低減していることが確認できるが，前加工粗さが顕著でない場合，200 N では粗さの悪化が見られる．六方最密構造である Ti64 は結晶内のすべり面の数が限られており，常温での塑性変形が起きにくい材料である．そのため非常に高いバニシング力では過硬化によって材料が十分流動せず結晶粒の固まりが剝離しやすい．以上から，過剰な負荷力による工具転写痕の形成や表面層の剝離の減少を考慮すると，初期粗さによってもバニシング力の最適化が求められることがわかる．

なお同じ面にバニシングを 2 回施した場合それぞれ”×2“と表記しており，加工回数の増加でのわずかな改善がみられた．1 回目に塑性変形しきれなかった凹凸や工具転写痕を，2 回目のパスが繰り返し荷重の役割を果たすことで，表面が平滑されていることが推測される．

3・2　硬度の評価

図 5，図 6 に 2 ㎜厚の Ti64 をバニシング加工後の硬度変化を示す．測定にはマイクロヴィッカース硬度計(HM-210C，Mitutoyo)を使用し，硬度の単位としてヴィッカース硬度(HV)を用いた．それぞれの条件で 10×10 ㎜の範囲で加工されたエリアの 5 か所で測定を行い，その平均値をデータとして使用している．計測条件は試験力を 1 N とし，負荷時間 4 s，保持時間 10 s，除去時間 4 s とした．なお条件ごとの硬度変化をわかりやすくするため，いずれもグラフ縦軸 HV の下限を 200 として示す．

図 5 は試料の裏表を対象に，異なるステップ幅でバニシング加工後の硬度を示している．圧延状態は“Original”，切削による前加工状態は“Milling”として示す．バニシング力は 100 N で一律である．結果，前加工を施された試料はフライス加工中に発生する加工硬化の影響で硬度が上昇しているが，バニシングを施すと，さらに硬度が向上した．ステップ幅が大きくなると硬度が減少し，表面粗さ測定では明確な違いのなかった 0.03 ㎜と 0.05 ㎜の差からも，この現象が確認できる．ボールチップと試料表面との接触幅よりもステップ幅が狭いとき，1 つのステップに重複して加工される部分が生じる．このオーバーラップと呼ばれるエリアが広いほど，同じ地点で加工処理される回数が増加するため，硬度の上昇につながる．

図 6 は試料の裏表を対象に，異なるバニシング力とパス回数による硬さ変化を示す．ステップ幅は変化量の大きか

った 0.03 mm で一律とした．図から，最もバニシング力の低い 50 N でも，図 5 に示される前加工状態からの硬度の向上が確認できる．また，バニシング力の上昇にともない硬化の影響が増加している．これは押し付けの力が大きいほど塑性変形量も大きいことから，表面近傍の微小なキャビティ（空隙）が充填されることで内部密度の増加が促進され，結果として加工硬化が生じていると考えられる．同じ面にバニシングを 2 回施した場合も硬度の向上が確認できる．このパス回数の差は，表面粗さの改善にはあまり効果が見られなかったものの，硬度には繰り返し荷重の影響として反映された．これは，前述のステップ幅変更時のオーバーラップエリアと同様の効果である．

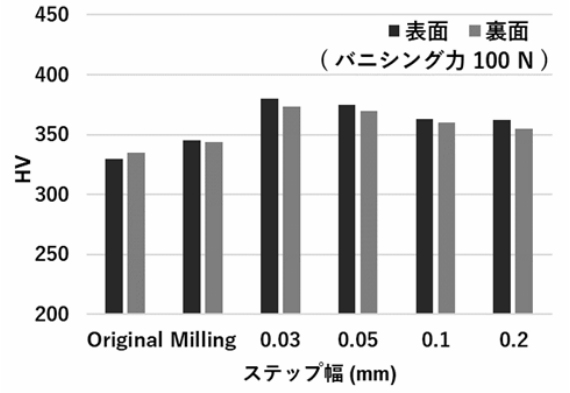


図 5　ステップ幅の硬度への影響

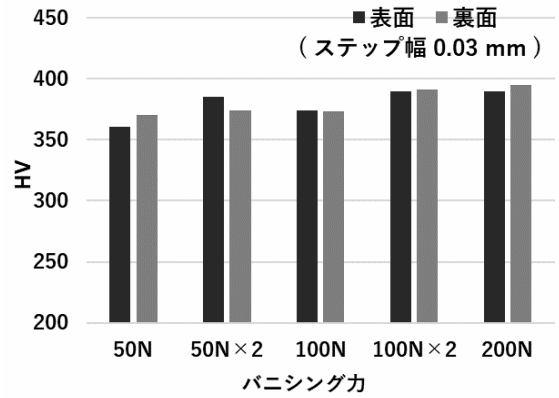


図 6　加工回数とバニシング力の硬度への影響

3・3　残留応力の評価

バニシング前後の残留応力変化を X 線解析装置(X'Pert PRO MPD, PANalytical)にて測定する．測定距離 20 mm，測定角度 113° ～118°（2θ－ω)にて，計 5 つのピークのズレから算出した．

図 7 に Ti64 の前加工面と，異なる測定方向およびステップ幅のバニシング加工面の残留応力を示す．試験片は 2 mm 厚で，バニシング力は 100 N で一律である．結果として，いずれの条件でも前加工面よりも大きな圧縮方向の応力がバニシング面に残留していることがわかる．測定方向の違いでは，ステップ幅が同じでも，送りに平行方向よりも垂直方向の圧縮残留応力の方が高くなっている．残留応力は本質的に多軸な要素であるため，往復走査線の軌跡をたどるバニシングプロセスの方向性が関係する．平行方向の測定では，表面層が送り方向に引き延ばされるような塑性流動を観測する．そのため，深さ成分にも引張の応力がわずかに干渉することで最終的に圧縮応力が緩和される．一方，垂直方向の測定では，各ステップで形成された窪みに残留する力が互い干渉することで，圧縮の応力がさらに助長される形をとる．

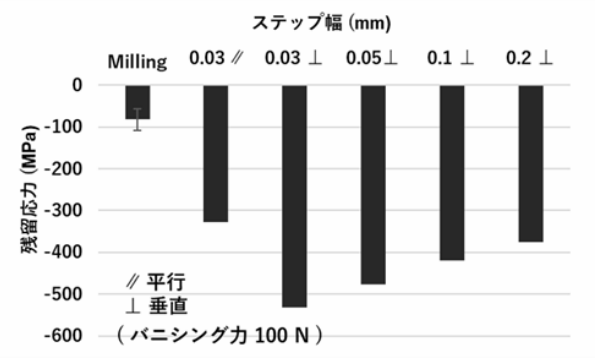


図 7　ステップ幅と送り方向の残留応力への影響

垂直方向のステップ幅の違いに関しても加工硬化の傾向と同様に，間隔が大きくなるほど圧縮残留応力が減少していることがわかる．このオーバーラップエリアの増大は繰り返し荷重以外にもバウシンガー効果の影響が及ぼされると考えられる．これは往復荷重下では加工応力が試料内部にさらに伝達されやすく，同じ応力でもより大きな塑性変形を誘発しやすいというものである．

図 8 に異なる厚みの Ti64 材に対するバニシング力および深さごとの残留応力を示す．測定は圧縮応力の高かった垂直方向を対象に，ステップ幅 0.03 mm，同一条件で加工した試料両面の平均を算出する．深さ方向の応力分布の確認は，表面を電解研磨により一定深さ除去してから計測を行うという作業を繰り返す．

結果として，どの条件でも表面から離れるほど圧縮残留応力が減少する傾向が見られる．異なるバニシング力で比較すると，2 mm 厚試料の場合，深さ 300 μm までのすべての層でバニシング力の上昇にしたがって圧縮の残留応力

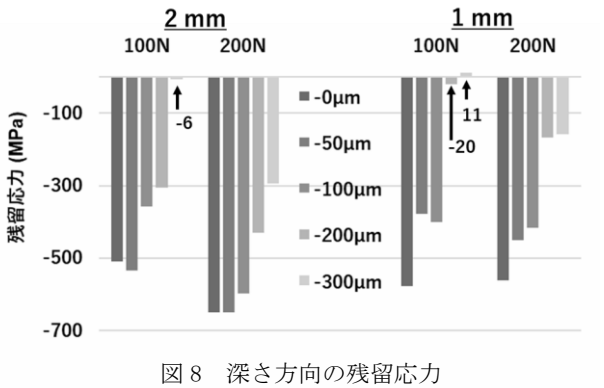


図 8　深さ方向の残留応力

が上昇していることがわかる．圧縮した表面の塑性変形層によって体積が微小に収縮されると，試料内部の深層領域にはこれを元の状態に戻そうとする反対の力，すなわち引張の応力が働く．これは試料全体の残留応力を常に平衡状態を維持しようとする作用である．2 mm 厚試料のように厚さに余裕がある場合，発生した引張応力の広がりは内部の広い領域内でとどまるため，表面層の圧縮応力には影響が及ばない．一方，より薄い 1 mm 厚試料の場合，特に高い応力が残留する表面近傍の層では内部応力の反発の影響を受やすい．そのため，深さ 100 μm までの層では，バニシング力の違いによって残留応力にほとんど変化がみられなかったと推測する．また図 2 でみられた片面加工による変形も，片側に誘導された圧縮応力に対して引張応力が反対領域で発生することで応力のバランスがとられる一方，正負の偏りで変形が引き起こされたと説明できる．

また同じバニシング力でも試料が厚い方が，いずれも圧縮残留応力が深くまで浸透している傾向にある．これは前述の内部応力の調整作用に加えて，両面加工による相互の影響も関係する．2 mm 厚では高い応力が両面に負荷されても互いに干渉することなく，全体で正負の均衡が保たれている．しかしながら，同じ応力でも薄肉であるほど試料に及ぼす影響がおおきくなるため，より薄肉な 1 mm 厚では一方の反転した応力が反対面の圧縮応力を直接抑制する作用を引き起こす．以上の内部調整力と相互の抑制作用によって，薄肉試料の場合は圧縮残留応力の大きさと残留深さが緩和されたことが考えられる．

3・4　疲労強度の評価

疲労試験機（ElectroPuls E10000, INSTRON）にて，1 mm 厚 Ti64 の前加工状態とバニシング後の試料についての疲労強度を評価する．薄肉試料の引張－圧縮の試験では座屈が生じる可能性があるため，引張－引張の条件で実施している．10^4 回以上の高サイクル疲労で破断が生じるよう応力振幅を 550 MPa，周波数を 30 Hz および応力比を 0.1 として設定する．

図 9 に疲労試験でのそれぞれの材料に対する破断までのサイクル数を示す．グラフ中の縦棒の本数は試験した検体の数である．結果としてサイクル数が，前加工状態で平均 3.3×10^4 回であるのに対し，バニシング後は平均 4.0×10^4 回と約 21%の向上が確認できる．疲労試験の結果にばらつきが生じやすい理由は，内在する微小な亀裂などで各個体差の影響が大きいからである．

バニシング後の試料の疲労強度を全体的に向上させた要素の 1 つに残留応力が挙げられる．3.3 節で示したように，バニシングによって表面層には圧縮残留応力が誘導され，薄肉試料両面に均等に蓄積された圧縮の応力が高サイクル疲労における亀裂の開始を効果的に遅らせる作用となる．また，表面粗さの改善の影響も考えられる．3.1 節で示した通り，バニシングにより前加工状態の試料表面を一定の滑らかさに仕上げることができるため，応力集中が生じやすい微小な凹凸を減らすことで早期疲労亀裂の核生成を遅延することにもつながる．以上の要素から，薄肉部品の疲労強度の向上に Ti64 のような強度の高い材質でも，当該工具のバニシング加工の適用が有用であることがわかる．

4．自由曲面試料の加工

4・1　ツールパスの作成と適用

まず，形状データの取得を試料に沿ったツールパスの作成と，加工前後の変位比較のため行う．試料の測定にはレーザー変位計（LK-080, KEYENCE, 以降 LDS と記述）を利用した．測定範囲は±15 mm，繰り返し精度は 3 μm であり，非接触で高精度な測定が可能である．LDS は三角測量の原理で，ワーク表面に反射したレーザー光の距離を判別するため，ワークの色や材質の影響を限りなく最小限に抑えることができる．そのため曲率変化の激しいタービンブレード試料において各断面曲線をノイズの欠陥なく正確に抽出できる点が LDS を利用する最大の利点である．

計測方法は LDS を一定速度で試料前面と後面に通過させ，高さごとにそれを行う．取得した座標データを，スプライン曲線で繋ぎ合わせることで，試料全体の断面曲線データを取得する．図 10 に測定時の様子と取得した断面曲線データを示す．

機械加工には X, Y, Z の基本的な動作軸のみを利用する 3 軸加工と，工作物の回転や傾きを加えた多軸加工が存在する．3 軸加工は条件設定や調整が比較的容易である一方，

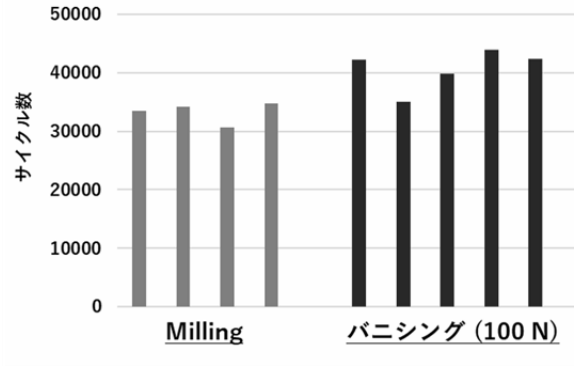


図 9　疲労試験の結果

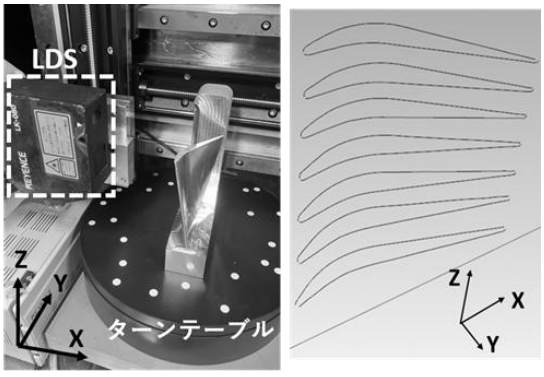


図 10　測定時の様子と取得した断面曲線データ

自由曲面の加工が難しく，特に加工中のワークの再セットアップは手間や時間がかかるなど作業効率を低下させる．そこで，タービンブレードに対しては 3 軸に加え C 軸（Z 軸まわりのワーク回転軸）を利用した加工を適用する．連続的なツールパスが求められるバニシング加工において，試料の形状に加工エリアを左右されない動きの実現は重要なものとなる．また力学的な観点からも，常に加工面に垂直に圧力をかけられるため，傾斜によるバニシング力の分散を抑制することも期待できる．

図 11 にタービンブレード試料加工時の側面図と上方から見た様子を示す．いずれも 3 軸加工の時と同様，往復走査線状の軌跡で動かすため A 軸（X 軸に対するワークの傾斜軸）は 0° とし，試料の曲率に合わせて C 軸を稼働させている．加工面を常に工具に対して垂直に維持できるため，傾斜面でのボールホルダーの衝突を防ぐことができる．また，取得した断面曲線をもとに抽出した中心曲線に沿ったツールパスを組むことで，2 つのボールチップの真ん中に試料中心がくるような動きを実現する．

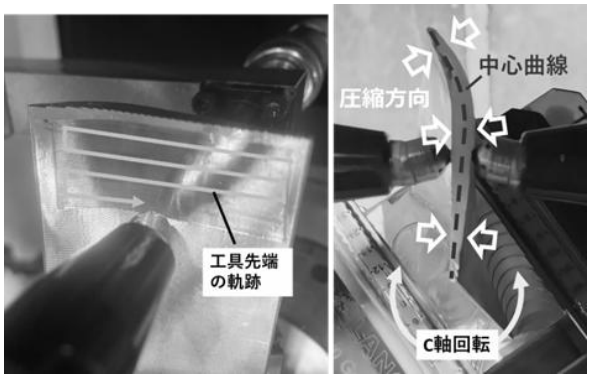


図 11　加工時の側面と上面の動き

4・2　加工結果

図 12 に 50 N でバニシング加工した A5052P 試料を示す．白色鍵括弧内がバニシングエリア（送り速度 1500 mm/min，ステップ幅 0.08 mm）である．結果として，試料全面に対して加工が施されていることがわかる．3 軸に加え C 軸を用いた加工により，裏表での加工エリアのズレがなく，縁に沿って仕上げられている．また，ボールホルダー部の伸縮量によってバニシング力に差がないことは確認済みであることから，試料の厚さが変化しても常に一定の圧力が保持される．

表 1 に加工前後の算術平均粗さと硬度について評価した結果を示す．粗さ測定は試料の表裏それぞれ 6 箇所の異なる位置を対象とし，平面試料と同様に送りに対して垂直方向を評価している．硬度は測定荷重 0.2 N にて試料の裏表それぞれ 2 箇所を測定する．バニシング適用後いずれも改質効果がみられ，粗さに関しては，もとのおおよそ 10 % まで改善されている．

バニシングによる変形量を評価するため，加工前後に LDS で取得した測定モデルを用いて形状比較を行う．オープンソース 3D 点群処理ソフトウェアである“Cloud Compare”を利用し，それぞれの比較には ICP(Iterative Closest Point)アルゴリズムを適用した．これは２つの点群やモデルの位置合わせ手法で，今回は各断面曲線をロフトして生成したポリゴンサーフェイスを対象とする．

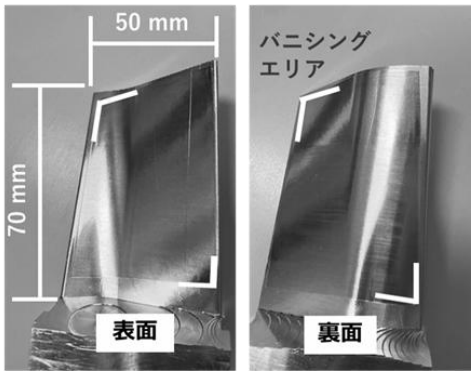


図 12　加工後のタービンブレード試料

表 1　加工後の表面粗さと硬度の変化

	加工前	加工後
表面粗さ	Ra: 6 ～12 μm	Ra: 0.5 ～0.9 μm
硬度	HV: 71	HV: 92

図 13 に加工前後の測定モデルの偏差をカラーマップとヒストグラムとして示す．また，Savio ら[1] はタービンブレードにおける許容可能な測定偏差について最適偏差を 100 μm 以下としている．そこで，ヒストグラムでは最適偏差を白点線で区切って示している．

結果として，加工エリア全体の 85 %が最適偏差範囲である 100 μm 以内に収まっている．この偏差 100 μm 以上のエリアの多くはサーフェイス作成のもとにした複数の断面曲線上に発生している．しかしながら，対応する両面がともに大きな偏差をもつ箇所は少ないことから，これらはモデル作成時のずれの可能性があり，材料の変形によるものではないことがわかる．

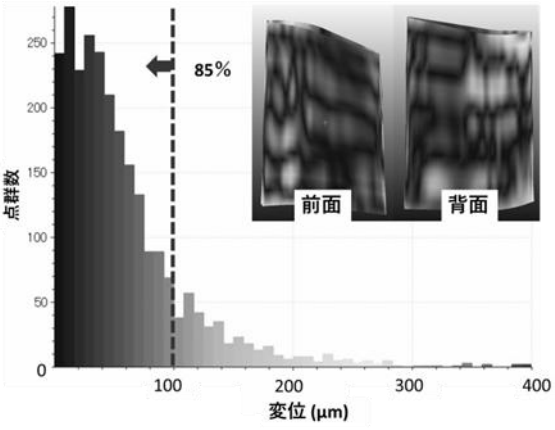


図 13　加工後の変位差のカラーリングとヒストグラム

以上の結果から,厚みの変化する自由曲面試料に対しても形状に沿ったツールパスを適用することで,試料全面に滑らかなバニシング仕上げ面を施すことが確認できる.また強度の低い A5052P 薄肉試料でもバニシングによる変形が十分抑制されている.これにより,さらに高強度な Ti64 などの薄肉部材に強いバニシング力が負荷されても,同様に加工後の変形は抑制されることが考えられる.

５．結語

本研究では,両面から荷重を付与可能なバニシング工具を開発し,薄肉板材に対する加工特性および自由曲面試料への適用性について検討を行った.

その結果,バニシング加工により,表面粗さの低減,硬度の向上および圧縮残留応力の導入といった表面改質効果が確認され,薄肉材料においても有効な表面改質手法であることが示された.また,両面からの荷重付与により,加工時の変形を抑制できることを明らかにした.

さらに,形状に応じたツールパスと多軸制御を適用することで,タービンブレードのような複雑な自由曲面を有する部品に対しても,加工面全体に均一な表面改質層を形成できることを確認した.

以上より,本研究で提案した両面バニシング加工および加工システムは,複雑形状を有する薄肉部品に対する高品質な表面改質層創成に有効であり,実用化に向けた有望な加工技術であることが示された.

謝　辞

本研究は天田財団一般研究開発助成(AF-2023004-B2)を受けたものであり,深く感謝申し上げます.

参考文献

1)　Savio E, De Chiffre L and Schmitt R. Metrology of free form shaped parts. CIRP Ann Manuf Technol, 2007, 56: 810–835.