

# コーテッドローラによるローラバニシング加工法の提案

金沢大学 理工研究域 機械工学系

助教 岡田 将人

(平成 23 年度一般研究開発助成 AF-2011011)

キーワード：表面仕上げ，バニシング，ローラ，表面性状

## 1. 研究の目的と背景

ローラバニシング加工法（以後，ローラバニシ加工）は，加工対象面上の微小凹凸を自由回転するローラで押しなすことで，対象面上の微小凹凸に塑性変形を付与し，対象面の表面粗さを向上させる加工法である．表面仕上げに多く用いられる研削加工と比較して，ローラバニシ加工は高い加工効率を有するとともに，切削加工に用いられる工作機械で加工が可能なることから専用機導入コストも要せず，段取りレス，工程集約化の観点からも有用な加工法である．さらに，加工によるスラッジの発生がなく環境負荷低減の観点でもメリットがある<sup>1)</sup>．そのため，これまでにローラバニシ加工に関する種々の理論的，実験的研究が報告されてきた<sup>2)~5)</sup>．ローラバニシ加工では，ローラの転動により対象面に対し垂直方向の圧縮力が付与されることで対象面上の微小凹凸が押しなされるが，この圧縮力のみでは所望の押しならし量が得られない場合がある．そのため，レーザにより加工部を加熱して材料を軟化させることにより所望の押しならし量を得る加工法<sup>6)</sup>などが考案されているが，このような加工法の場合，装置ならびに加工方法が複雑化するため，十分な実用化には至っていない．

一方，チップ状のダイヤモンドを対象面上に擦りつけて摺動させることで，ローラバニシ加工と同様の効果を期待する加工法としてダイヤモンドチップバニシング加工法（以後，チップバニシ加工）があり，主に高硬度材を対象とした加工に対し有用であることが報告されている<sup>7)</sup>．チップバニシ加工は，対象面上の微小凸部に対する圧縮方向の作用のみならず，摩擦によるせん断，曲げ方向の作用を付与でき，より大きな押しならし量が期待できる．しかしながらチップバニシ加工は，工具が高価であり，対象面との摺動による摩擦熱により，加工条件によって急激に工具摩耗が生じる．さらに，工作物材料が軟質であると加工表面層のむしれや剥離が生じる場合もある<sup>8)</sup>．これらのことから，転動と摺動の両作用をバランスよく対象面に作用させることができる加工法が考案でき

れば有用性が高いといえる．

丸棒外周面のローラバニシ加工の場合，ローラの回転軸は工作物回転軸と平行に配され，工作物の回転に対しローラが従属的に同一の周速度で回転することで工作物表面上を転動する．ここで，ローラの回転軸を工作物回転軸から傾斜させると，工作物周方向ならびに軸方向に対し，ローラとの接触点において工作物，ローラの両者間に速度差が発生する．これにより，ローラバニシ加工でも転動に加えて摺動作用が発現でき，傾斜角度の変更により，両作用のバランスを任意に調節することが可能になると考えられる．また，このような摺動作用をローラバニシ加工に発現させた場合，転動のみが作用する従来のローラバニシ加工に比べて，摺動によるローラの摩耗対策が，より重要になると考えられる．

そこで本研究では，工作物回転軸に対してローラの回転軸を傾斜させた傾斜ローラバニシング加工法（以後，傾斜ローラ加工）を提案し，その加工特性を両回転軸が平行な従前のローラバニシ加工（以後，平行ローラ加工）と比較することで明らかにした．丸棒材の外周面を加工対象とし，提案する加工法の加工原理について理論的に検討した．また，加工面の表面形状から，提案する加工法の有用性を実験的に明らかにした．加えて，ローラの摩耗対策として窒化物などの種々のコーティング処理を施したコーテッドローラを平行ならびに傾斜ローラ加工に適用した場合の加工特性について明らかにしたので報告する．

## 2. ローラバニシング加工法

### 2.1 ローラバニシング工具

図 1 に本実験で用いたローラ加工用工具(SR5AL-S25, 株式会社スギノマシン)の外観を示す．本工具は，シャンク部を NC 旋盤等の刃物台に固定することで使用する．工作物と接触するメインローラはリテーナとサポートローラにより支持され，自由回転する．本体内にばねが内蔵されており，これによりメインローラの対象面への押付力を押

し込み量から制御できる。図2に加工時における加工部側面からの模式図を示す。図に示すように、工作物は工作機械の軸軸により回転させられており、これに自由回転するメインローラを押し当てることで工作物表面上をローラが転動する。なお、メインローラはテーパ形状を呈しているため、工作物表面とはメインローラの最大外径部において点状で接触している。メインローラを転動させながら工作物回転軸方向に送ることにより、工作物外周面全体にローラバニシ加工を付与する。

## 2.2 摺動作用の発現機構の理論的検討

図3に本研究で提案する傾斜ローラ加工における加工部の模式図を示す。メインローラは回転する工作物と接触することにより工作物回転軸から $\alpha^\circ$ の角度で傾斜した回転軸周りに回転する。ここで、メインローラとの接触点における工作物外周面の周速度を $V_w$ とする。工作物とローラが点接触していると仮定すると、メインローラの周速度 $V_r$ は次式で表せる。

$$V_r = V_w \cos\alpha \quad (1)$$

ここで、 $V_r$ の工作物外周面の周方向成分 $V_i$ ならびに回転軸方向成分 $V_a$ はそれぞれ $V_w$ により次式で表せる。

$$V_i = V_w \cos^2\alpha \quad (2)$$

$$V_a = V_w \cos\alpha \sin\alpha \quad (3)$$

メインローラと工作物間の摺動作用は各方向成分の速度差によって発現するため、 $V_w$ と $V_i$ との速度差 $V_{st}$ が工作物外周方向の摺動速度を、 $V_a$ と工具送り速度 $F$ との差 $V_{sa}$ が工作物の回転軸方向の摺動速度を示すといえる。

図4に工具送り速度 $F$ を無視した場合のメインローラ傾斜角度 $\alpha$ と $V_w$ に対する $V_r$ 、 $V_{st}$ 、 $V_{sa}$ の百分率の関係を示す。図に示すように $\alpha$ が $0\sim 45^\circ$ の範囲において軸方向の摺動成分のほうが大きいことがわかる。またそれ以降の $\alpha$ においては、接線方向の摺動成分が大きくなり、 $90^\circ$ において完全にローラは転動の作用がなくなり、チップバニシ加工と同様の摺動作用のみによる加工となる。図5に傾斜ローラ加工用工具の外観を示す。治具により、メインローラ、サポートローラの両者を傾けた。

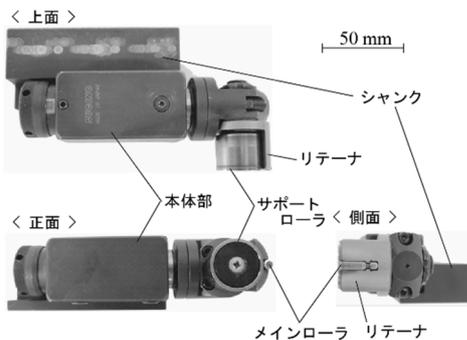


図1 ローラバニシ加工用工具

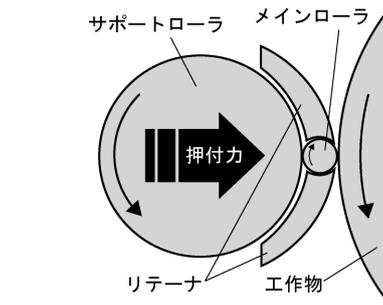


図2 加工部概略

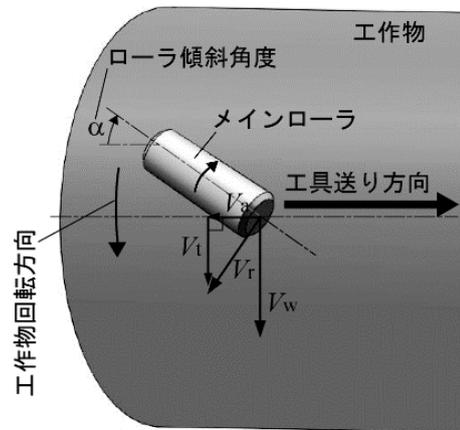


図3 傾斜ローラ加工概略

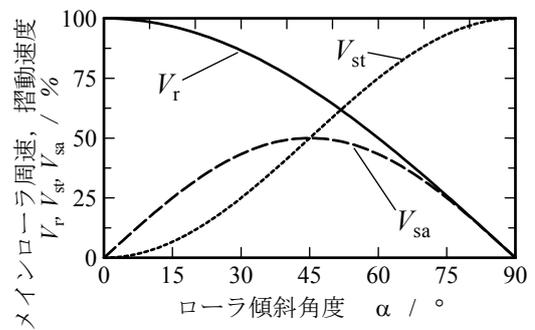


図4 傾斜角度によるローラ周速と摺動速度の傾向

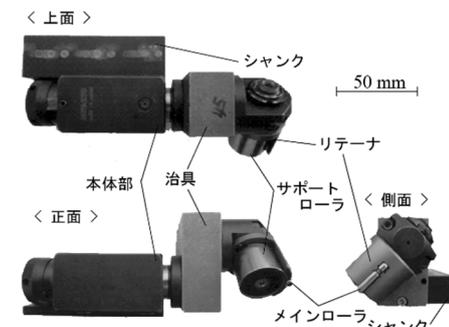


図5 傾斜ローラバニシ加工用工具( $\alpha = 45^\circ$ )

### 3. 実験方法

ローラバニシ加工にはNC旋盤(Quick Turn Nexus 200-II MY, ヤマザキマザック(株))を用いた。図6に実験時の外観を、表1に実験条件を示す。工作物にはアルミニウム合金 A2017 を用いた。ここで、ローラバニシ加工による仕上げ面は前加工面の表面形状の影響を受けることが報告されている<sup>9)</sup>。そのため、工作物の前加工面の算術平均粗さを  $R_a = 3.20 \sim 3.26 \mu\text{m}$  で揃えた。ローラの工作物への押付力  $F_t$  はばねの縮み量によるため、工具と工作物が接触してからの押し込み量により設定した。摩擦熱による加工特性への影響を極力避けるために、オイルミストを高圧エアと共に加工部に供給した。なお、これらのローラバニシ加工条件は従来の平行ローラ加工において一般的に採用されている条件を基準に選定した。

ローラバニシ加工面の評価として表面粗さ、表面形状の測定を行った。表面あらさは触針式表面粗さ計(SJ-301, 株式会社ミツトヨ)により工作物軸方向に測定し、6点測定の実平均値とした。基準長さは0.8mm、測定長さは4.0mmとした。3次元表面形状は触針式形状測定機(サーフコム 2000DX2, 株式会社東京精密)を用いた。

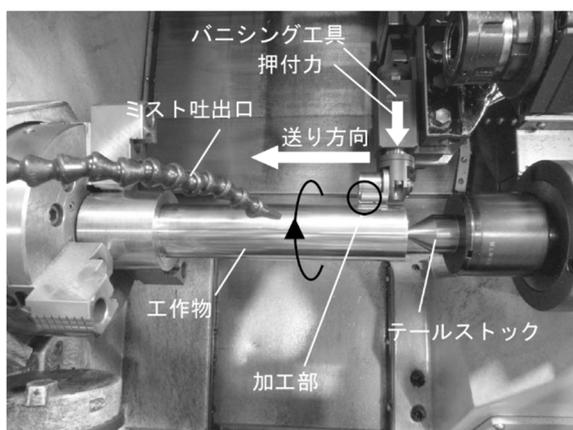


図6 ローラバニシ加工実験外観

表1 実験条件

工作物	アルミニウム合金 A2017	
前加工	切削工具	VNMG160408N-SU (ISO)
	切削速度	$v_c = 300 \text{ m/min}$
	送り量	$f_c = 0.3 \text{ mm/rev}$
	切込み量	$R_d = 0.25 \text{ mm}$
	潤滑方法	微量油(ミスト)供給 不水溶性植物油
バニシング加工	工作物周速度	$V_w = 100 \text{ m/min}$
	送り量	$f_r = 0.5 \text{ mm/rev}$
	押付力	$F_t = 45, 241 \text{ N}$
	ローラ傾斜角度	$\alpha = 0, 15, 30, 45, 60^\circ$
	潤滑方法	微量油(ミスト)供給 不水溶性植物油

### 4. 傾斜ローラバニシ加工法の加工特性

#### 4.1 傾斜ローラ加工による仕上げ面の表面粗さ

図7にローラ傾斜角度 $\alpha$ とローラバニシ加工面の算術平均粗さ  $R_a$  の関係を示す。いずれの $\alpha$ においても前加工面の平均  $R_a = 3.24 \mu\text{m}$  より大幅に表面粗さが改善されており、 $\alpha$ によらずローラバニシ加工が表面粗さの向上に効果的であることがわかる。 $\alpha$ による傾向をみると、 $\alpha = 0 \sim 45^\circ$  においては $\alpha$ の増加に伴い  $R_a$  が減少しており、 $\alpha = 45^\circ$  では  $R_a = 0.4 \mu\text{m}$  以下にまで達している。このことから、提案した傾斜ローラ加工法が表面粗さの改善に有効であるといえる。

これに対し、 $\alpha = 60^\circ$  では、それまでの傾向から一転して表面粗さが悪化している。4.1節で述べたとおり、 $\alpha = 60^\circ$  では、加工中のメインローラに回転は認められず、工作物とメインローラ間は摺動のみで回転が得られていない状態である。このことから、傾斜ローラ加工では回転と摺動の両作用をバランスよく付与することが有効であると考えられ、本実験では $\alpha = 45^\circ$  が最も良好な表面粗さが得られた。

#### 4.2 傾斜ローラ加工による仕上げ面の表面形状

図8(a)~(c)に前加工面ならびにローラ傾斜角度 $\alpha = 0, 45^\circ$  における工作物表面の3次元形状を示す。図より、いずれの $\alpha$ の場合も前加工面で認められる旋削加工の送りマークを十分に押しならせていることがわかる。また(b), (c)を比較すると、 $\alpha = 45^\circ$  では周期的に認められる凹部に材料が押しならされている形態が確認できる。これは工作物回転軸方向の摺動作用が寄与していると考えられる。加えて $\alpha = 45^\circ$  では、周期的な凹凸上に存在する短周期の微小な凹凸が低減されていることがわかる。これらのことより、傾斜ローラ加工では摺動作用により、周期の短い微小凹凸に対する押しならしの効果が顕著であり、これが表面粗さの向上に寄与しているといえる。

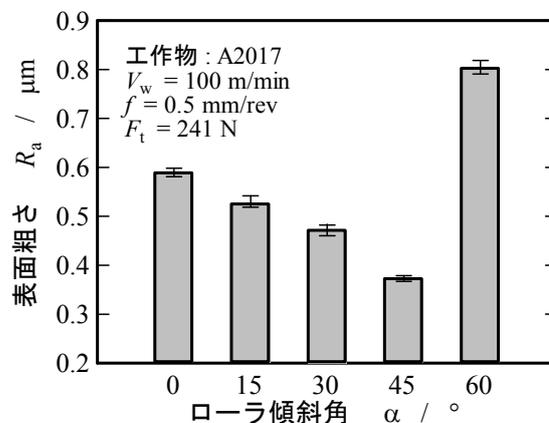


図7 ローラ傾斜角が表面粗さに及ぼす影響

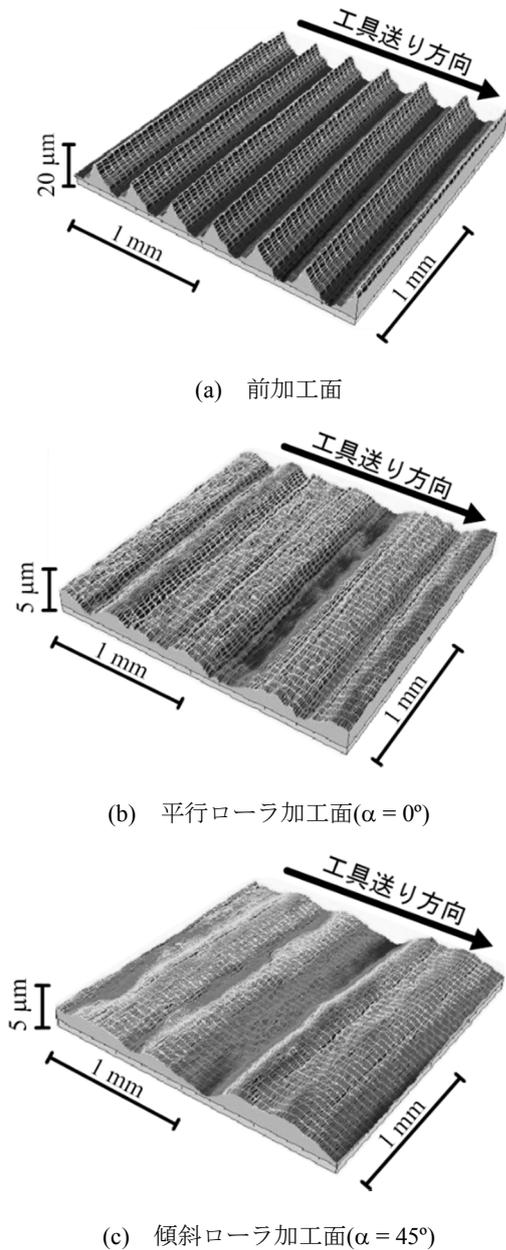


図8 ローラ傾斜角が表面形状に及ぼす影響

## 5. コーテッドローラのローラバニシ加工への適用

### 5.1 コーテッドローラ

平行ローラ加工ならびに傾斜ローラ加工にコーテッドローラを適用した。表2に作製したコーティング膜材質の硬さならびに表面粗さを未処理ローラのそれらと併せて示す。コーティング膜材質は切削工具や成型金型で多用されているものの中から選定した。いずれのコーティング膜材質も母材となる未処理ローラと比べて、極めて高い硬度を有しており、摺動に対する耐摩耗性の向上が期待できる。また、表面粗さも未処理ローラよりも低く、特に(Ti,Mo)Nは高い硬度と平滑な表面を持ち合わせていることがわかる。

表2 コーティング膜材質の硬さと表面粗さ<sup>10)</sup>

	ビッカース硬さ HV	表面粗さ $\mu\text{m}$
未処理ローラ母材	860	0.067
TiN	1600-1800	0.040-0.060
(Ti,Mo)N	1800-2000	0.005-0.010
DLC	2000-2200	0.010-0.015
(Al,Cr)N	2000-2200	0.040-0.060

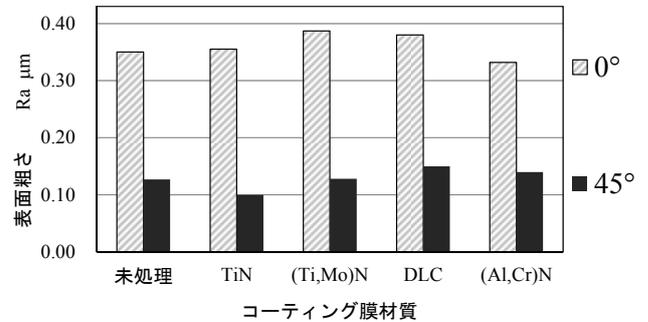


図9 コーテッドローラによる仕上げ面粗さ

### 5.2 コーティング膜材質が仕上げ面の表面粗さに及ぼす影響

図9に未処理ローラならびに表2で示したコーテッドローラを用いて平行ならびに傾斜ローラ加工を施した場合の仕上げ面の表面粗さを示す。なお、押付力は $F_t=45\text{N}$ と低く設定し、未処理ならびにコーティング膜材質の特性の違いが表面形状に及ぼす影響を得られ易くした。傾斜ローラ加工の傾斜角は未処理ローラで最も良好な表面粗さが得られた $\alpha=45^\circ$ である。図より、平行ならびに傾斜ローラ加工ともにコーテッドローラでも未処理と同程度の仕上げ面が得られていることがわかり、コーテッドローラを用いても、未処理同様にローラを傾斜させることにより、良好な表面粗さの仕上げ面が得られることがわかる。

### 5.3 ローラのコーティング処理が表面形状に及ぼす影響

ローラへのコーティングの有無ならびにコーティング膜材質がローラバニシ加工による仕上げ面の表面形状に及ぼす影響を検討するために、平行ローラ加工において工具送りを与えずに回転する工作物にローラを押し付けた加工部の外観観察ならびに形状を測定した。ローラを工作物に押し付ける時間は10秒間とした。図10に未処理ローラならびに(Ti,Mo)Nをコーティングしたコーテッドローラによる加工部の外観写真を示す。図より、未処理ローラの場合の加工部は前加工面の旋削による工作物外周方向の縞状の送りマークが確認できる。これに対し、コーテッドローラによる加工部には、送りマークが外観上認められない。

図11に図10で示した両加工部の断面曲線を重ねて示

す。断面曲線の測定は工作物回転軸方向に実施した。図より、両ローラともにローラのテーパ形状が加工部に転写されていることがわかる。また、未処理ローラによる場合よりコーテッドローラによる場合が、より深く加工が施されていることがわかる。両加工の押付力は同一であることから、この違いはローラにコーティングを施すことにより、ローラの変形抵抗が向上し、工作物との接触点におけるローラの微小な弾性変形量に差が生じたことに起因すると考える。これらのことから、図9に示した通り、コーテッドローラを平行、傾斜ローラ加工に供した場合の工作物の仕上げ面の粗さに未処理ローラとの顕著な差異は認められなかったものの、ローラのコーティングにより、ローラの機械的強度が向上し、それが加工特性に影響を及ぼすことが考えられる。

次に、平行ローラ加工において、工具を工作物回転軸方向に送った場合の仕上げ面の断面曲線を測定した。図12に未処理ローラ、(Ti,Mo)Nコーテッドローラによる仕上げ面の断面曲線を前加工面の曲線と併せて示す。図より、未処理ローラによる仕上げ面は、前加工面の旋削による送りマークと同程度の周期の凹凸が確認でき、十分な押しならし量が得られていないことがわかる。これに対し、コーテッドローラの場合は、送りマークの周期とは関係が認められない1.0mm程度の安定した周期のうねりが認められる。これは、工作物表面がローラにより圧縮され、ローラとの接触点周辺が盛り上がった形状が残存したものと考えられる。そのため、前述のとおり、コーテッドローラを用いることで、同条件下の加工においてもより大きな表面層の塑性変形量が得られると考えられ、適切な押付力ならびに工具送り量を検討することにより、未処理ローラよりも良好な仕上げ面性状が期待できるといえる。なお、これらの傾向は(Ti,Mo)N以外の膜材質のコーテッドローラにおいても同様であったことを付言する。

## 6. 結 言

従前の円柱外周面のローラバニシング加工において、ローラ回転軸を工作物回転軸から傾斜させることにより工作物表面に転動作用と同時に摺動作用を発生させることで、より良好な表面性状を得ることを目的とした傾斜ローラバニシング加工を提案し、その加工メカニズムと加工特性を理論的ならびに実験的に検討した。また、摺動作用によるローラ摩耗を抑制するためにローラに硬質薄膜をコーティングしたコーテッドローラをローラバニシング加工に適用し、その加工特性を従前のローラの場合と比較し検討した。コーテッドローラを用いることにより、仕上げ面の表面形状に明らかに違いが得られるこ

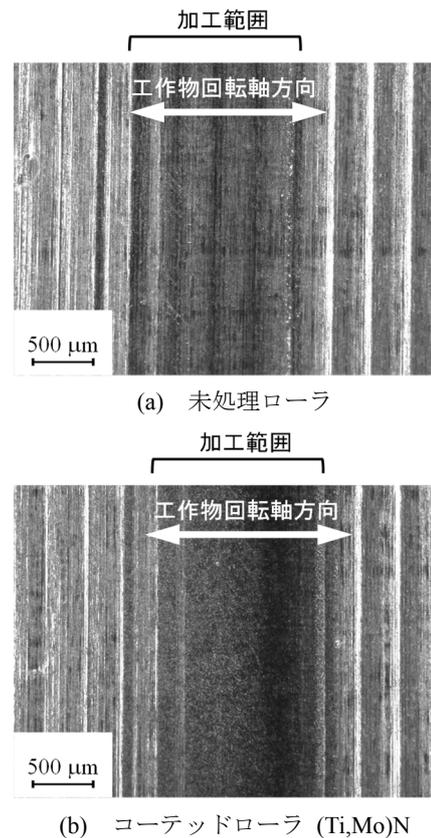


図10 工具送りを停止した加工部外観

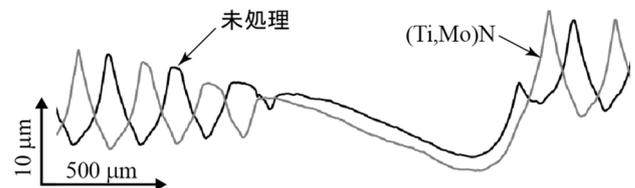


図11 未処理、コーテッドローラによる加工部の断面曲線の比較

とは確認できたため、今後は、それらの差異が生じるメカニズムの解明を行いたい。以下に本研究により得られた結果をまとめる。

- (1) メインローラを工作物回転軸に対して傾斜させることで、その傾斜角度に応じて工作物周方向、軸方向に摺動作用を発生させることができる。
- (2) 傾斜ローラバニシング加工は従前の加工法に比べ、傾斜角度  $45^\circ$  までの表面粗さが傾斜角度の増加に伴い向上する。またローラの回転が認められない傾斜角度  $60^\circ$  では、表面粗さの向上が得られない。
- (3) 傾斜ローラバニシング加工では、加工面上の短周期の微小凹凸に対して、高い押しならしの効果が得られる。

## 参考文献

- 1) TECH INFORMATION : 機械技術, 50-3 (2002), 12.
- 2) Ballnad P, Tabourot L, Degra F, Moreau V.: An investigation of the mechanics of roller burnishing through finite element simulation and experiments, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 65 (2013), 29-36.
- 3) Yen YC, Sartkulvanich P, Altan T.: Finite element modeling of roller burnishing process. *CIRP Annals*, 54 (2005), 237-240.
- 4) El-Tayeb NSM, Low KO, Brevern PV.: Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behavior of Aluminum 6061, *Journal of Materials Processing Technology*, 186 (2007), 272-278.
- 5) 岡島英昭, 鈴木哲哉 : 高速鏡面仕上げ「センタレス・ローラバニシング装置」の開発, *精密工学会誌*, 69-6 (2003), 759-762.
- 6) Tian Y, Shin YC.: Laser-assisted burnishing of metals, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (2007), 14-22.
- 7) Luo H, Liu J, Wang L, Zhong Q.: Study of the mechanism of the burnishing process with cylindrical polycrystalline diamond tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 180 (2006), 9-16.
- 8) 田中秀岳, 田太博章, 柳和久, 二村優 : 高硬度鋼材表面仕上げにおける前加工の表面性状がバニシング加工面へ及ぼす影響 : ダイヤモンドチップバニシング工具を用いた高硬度鋼材表面仕上げ加工に関する研究, *塑性と加工*, 50-581 (2009), 555-559.
- 9) Luca L, Neagu-Ventzes S, Marinescu I: Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels. *Precision Engineering*, 29 (2005), 253-256.
- 10) 株式会社北熱 : 技術資料, [http://www.hokunetsu.com/public/tec/pdf/Coating\\_PerformanceComparison\\_1209.pdf](http://www.hokunetsu.com/public/tec/pdf/Coating_PerformanceComparison_1209.pdf), 2014.5.10 参照

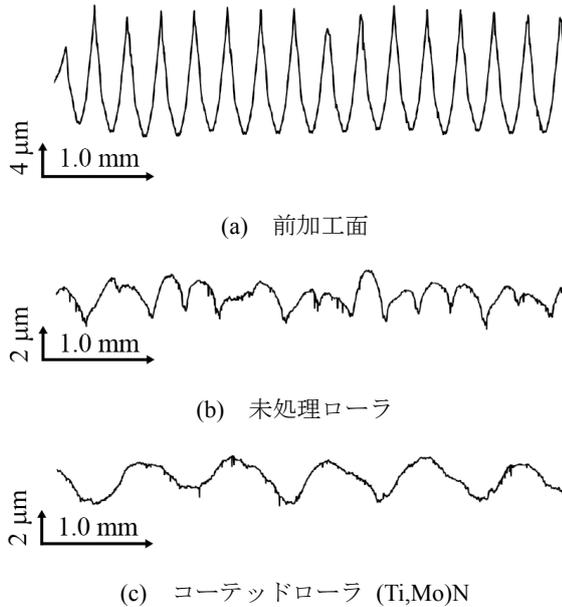


図 12 未処理, コーテッドローラによる仕上げ面の断面曲線

- (4) ローラにコーティング処理を施し, ローラ表面に高硬度で平滑な表面特性を付与しても, ローラ加工により得られる仕上げ面の表面粗さは, 従来ならびに開発した傾斜ローラバニシング加工方法の両者において未処理のローラによる場合と同程度である.
- (5) コーテッドローラによる仕上げ面の断面形状は, 同条件下においても未処理ローラによる場合より表面層の塑性変形量が大きい. また, コーティング膜材質による断面形状への影響は認められない.

## 謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2011011) によって行われたことを付記するとともに, 記して深甚なる謝意を表す. 加えて, 実験に協力いただいた金沢大学大学院の末信翔平君, 渡邊慶君に深謝する.