

マイクロ塑性加工における加工条件と表面微細形状の評価・表面機能の向上に関する基礎研究

東京工業大学 大学院情報理工学研究所 情報環境学選考

助教授 笹島和幸

(平成3年度奨励研究助成 AF-91034)

1. はじめに

機械加工部品の表面改質手法として、バレルやサンドブラストなどの手法が工業的に多く用いられている。これらによって、表面には圧縮の残留応力が生成されることが既に寿命などとの関連で重要視されている。一方、軸受機能や接触部の剛性などにおいては、これらのマイクロな加工によって形成される表面の微細形状そのものが、機能上有効に作用することも経験的に認められてきた^{1,2)}。

従来、これらの基本となるおうとつそのものの把握は、ほとんどの場合二次元の断面情報によっており、機能と結び付く三次元情報による例はあまり多くない。それは微細形状を作り出す加工の側においても同様であり、加工の条件と作り出された微細形状との間の関係について三次元的な議論はほとんど行われていない。すなわち、加工の指示は表面微細形状の高さなどのパラメータによっており、例えば加工痕やその方向性、一様性など、おうとつの特徴を表わすまでには至っていない。

そこで本研究は、表面の微細な形状を作り出す加工と、その結果作り出された表面の微細形状との間の関係を明らかにする研究の一端として、研削加工された平面試料と、そこにバレル加工を施した場合の表面微細形状を三次元的に測定し、加工による痕跡を評価するとともに、その現象の理解を可能ならしめる基礎を確立し、表面のマイクロ塑性加工の加工条件などと形作られる表面微細形状の関係を明らかにしようとするものである。

2. 実験方法

2.1 実験条件

実験に用いた測定試料は表1に、測定条件は表2に示す。表2の測定条件(a)は表面の微細なおうとつを三次元的にとらえるのに必要な最小限のものであるが、測定点数が紙面におうとつの情報を表わすには多すぎるため、本報告において白黒で特徴を伝えられる大きさとして測定条件(b)を併せて設定した。

Table 1 Specification of Samples

Size		$\phi 30 \times 10$
Process	Sample ①	Grinding
	Sample ②	Barrel with Triangular Prism after ①
	Sample ③	Barrel with Ceramic Sphere after ①
	Sample ④	Barrel with Ceramic Sphere after ②

Table 2 Measurement Conditions

(a)	Δ_x	$4 \mu\text{m}$
	Δ_y	$4 \mu\text{m}$
	N_x	250
	N_y	250
(b)	Δ_x	$1 \mu\text{m}$
	Δ_y	$1 \mu\text{m}$
	N_x	100
	N_y	100

Table 3 Specification of Developed Measuring System

Measurement Range	x: 100mm
	y: 100mm
Measuring Speed	x, y: 1~1000 $\mu\text{m}/\text{sec}$.
Sampling Resolution (That of Linear Scale)	x, y: 0.1 μm
Minimum Control Unit	x, y: 0.02 μm
Straightness of Motion	x: 0.2 $\mu\text{m}/100\text{mm}$
	y: 0.2 $\mu\text{m}/100\text{mm}$

Table 4 Specification of AFM

Measurement Range	x: 20 nm
	y: 20 nm
Measuring Speed	x, y: 0.05~130 Hz
Resolution	x, y: 0.2 nm
	z: 0.01 nm
Data Sampling Size	x, y: 512 \times 512

2.2 測定装置および測定方法

表面の微細な形状を三次元的に測定する装置は、高精度な機械要素部品とセンサを組み合わせ、マイクロコンピュータによる自動測定システムとして図1に示すものを開発した。この装置により、表3に示す幅広い条件で平面上に形作られた微細形状を高精度に測定し、離散化されたデータとして取得することができる。本測定装置の精度を表3に併せて示した。

また、さらに微細な領域の測定はAFMによって行う。AFMの主な仕様は表4に示す。

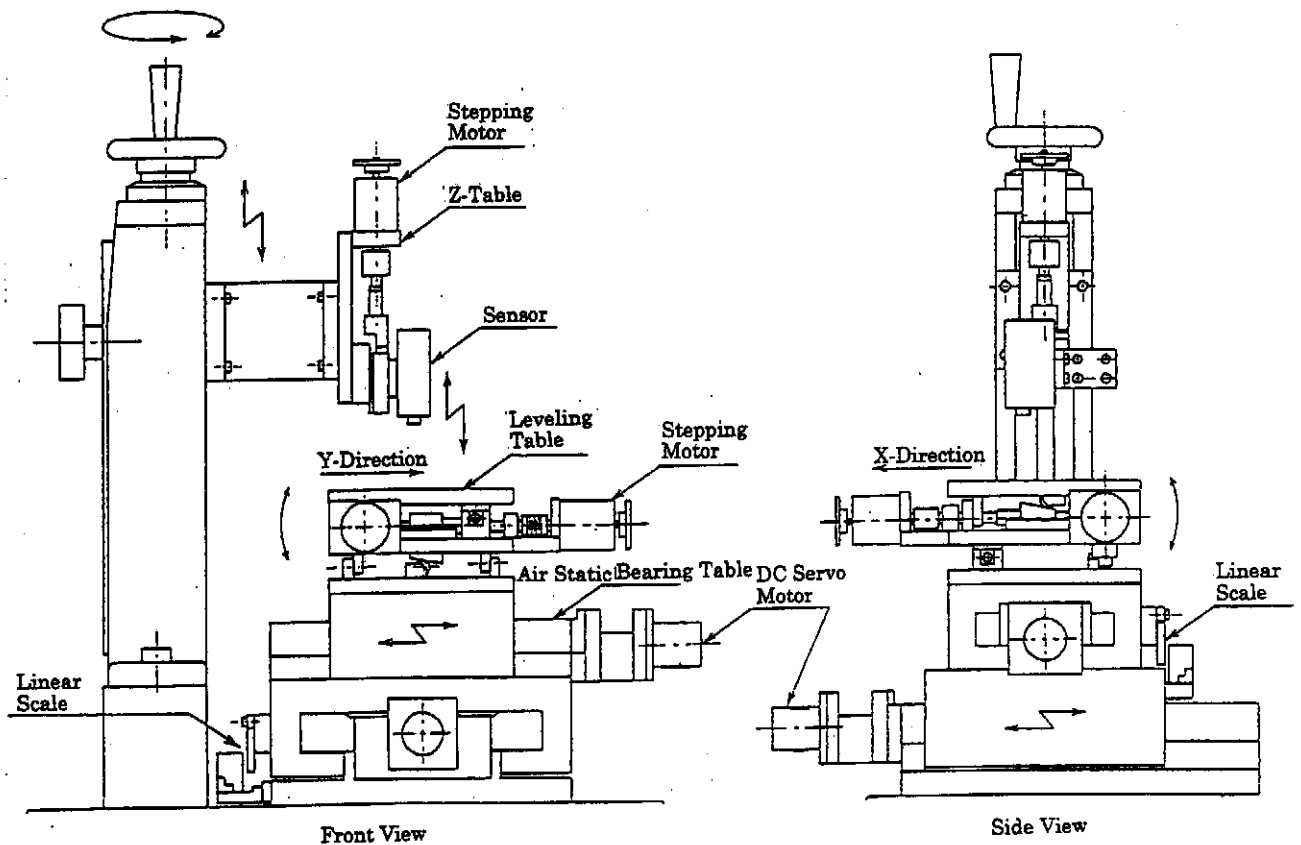


Fig.1 Developed Measuring Equipment Using Contact/Noncontact Type Stylus

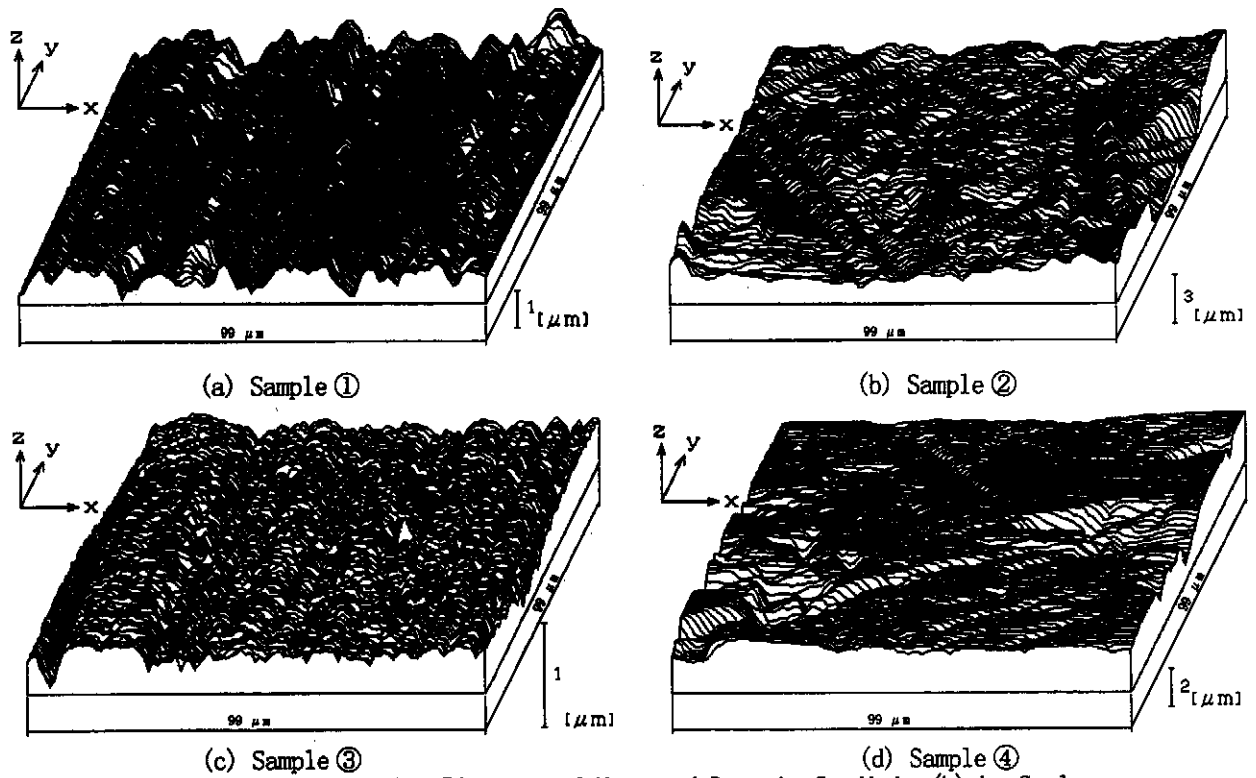


Fig.2 Perspective Pictures of Measured Data in Condition(b) by Stylus

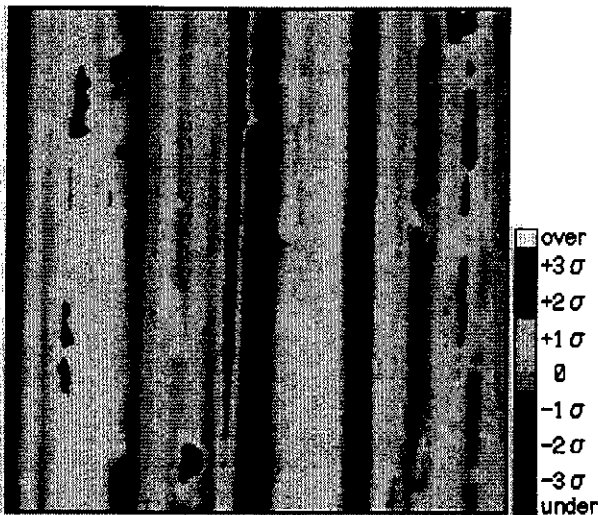
3. 実験結果

3.1 粗さ計スタイラスによる測定結果の射影図ならびに等高線図表示

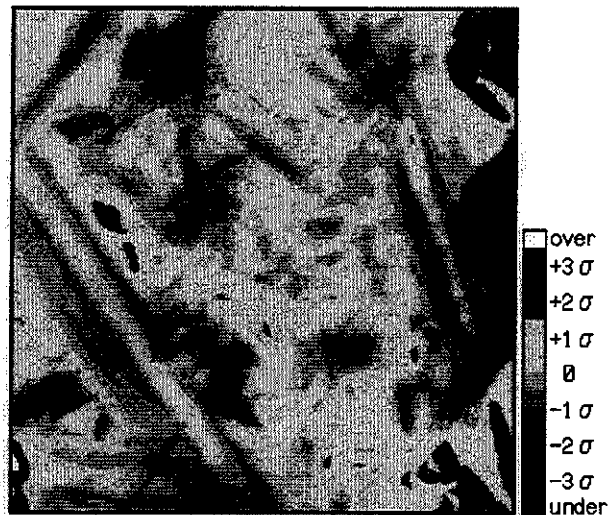
2章の各条件で測定したものの評価を視覚的に行うため、以下の表示処理を行った。まず、測定データ

は微妙なトレンドを有しているため、最小二乗法で平面回帰を行い、回帰後のデータを射影図ならびに等高線表示した。

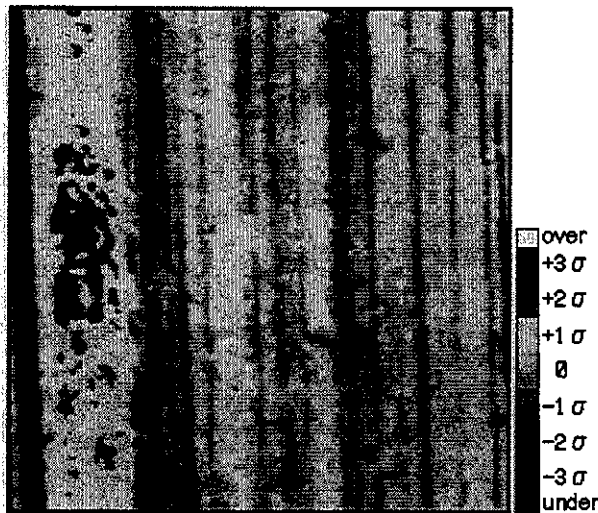
図2は試料①~④の、測定条件(b)の斜影図である。それぞれ加工法の特徴が認識できる。すなわち、(a)



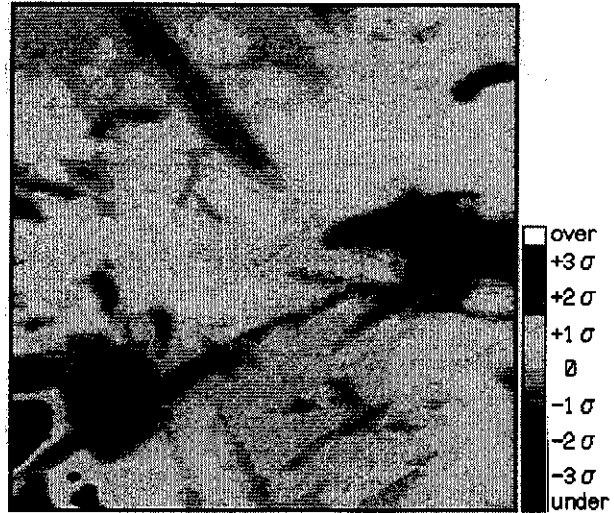
(a) Sample ① ($99 \times 99 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.23 \mu\text{m}$)



(b) Sample ② ($99 \times 99 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.41 \mu\text{m}$)



(c) Sample ③ ($99 \times 99 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.08 \mu\text{m}$)



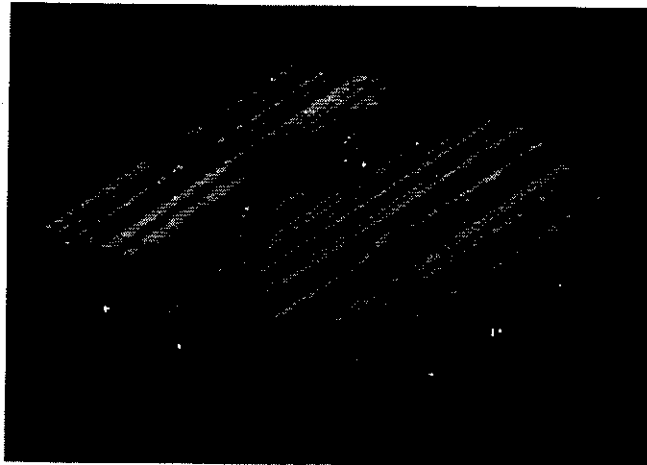
(d) Sample ④ ($99 \times 99 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.33 \mu\text{m}$)

Fig.3 Contour Maps of Measured Date in Condition (b) by Stylus (オリジナルはカラー出力)

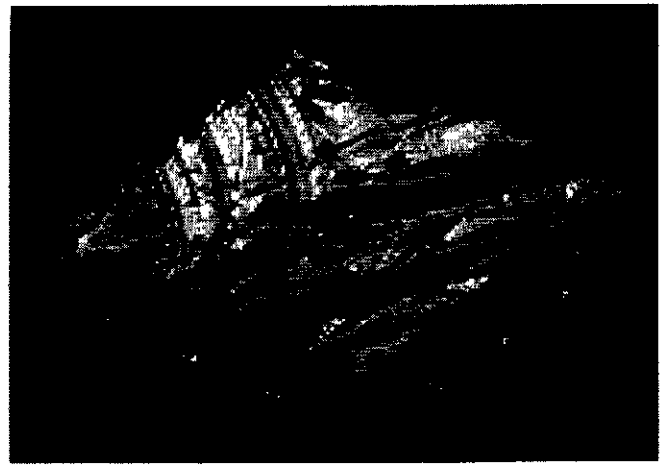
の研削加工においてはその筋目の方向性と、それに直交する方向の表面微細形状の複雑さがわかり、(b)のバレル加工①では三角柱のメディアが衝突したことにより生成されたランダムな谷状の形状が認められる。この加工法は、粗仕上げ用に使われるものであり、前加工の研削加工痕はほとんど確認できないまでに大きく表面形状が形作られている。(c)のバレル加工②では、研削加工された表面形状の全体的特徴は保存されているものの、局所的な研削加工痕は平滑化され、なおかつ表面上に球形メディアが衝突したことにより生成されたと思われる微細なあれが確認できる。(d)のバレル加工③では、バレル加工①で生成された三角柱メディアによる加工痕の大局的形状は保存され、なおかつその局所の微細な形状が平滑化されたような様相を呈している。

図3は図2に示した各測定結果の等高線表示であ

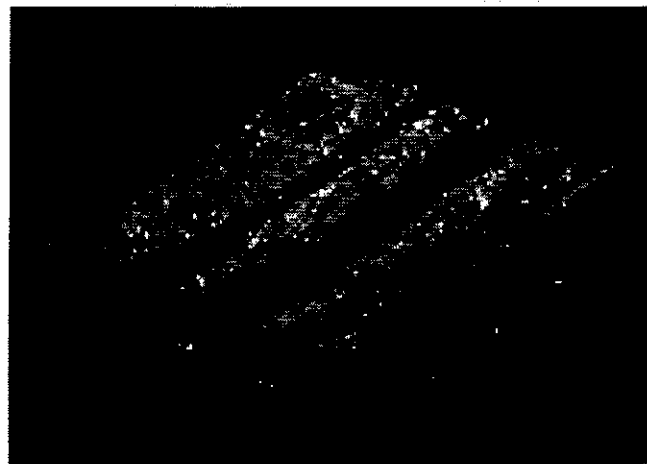
る。等高線表示によれば、それぞれの面の特徴を定量的に評価することができる。すなわち、(a)の研削加工では、他の多くの報告にも見られるように、砥石の加工方向に長い筋目の通った山と谷の形状が交互に現れている。(b)のバレル加工①では、(a)の研削加工痕はまったく確認することができず、三角柱メディアの衝突により新たに生じたランダムな方向の大きな溝やその周辺の盛り上がりを確認できる。(c)のバレル加工②では、(a)の研削加工のマクロな形状は保存されているものの、細長い山や谷が途中で分断されており、球形メディアの衝突によって研削加工で作られた筋目の強さが弱められていることが判る。(d)のバレル加工③では、(b)のバレル加工①で作られた三角柱メディアの衝突による大きな溝形状は保存されているものの、微細なおうとつはより平滑化されていることが判る。ここで注目すべきことは、同じ球形メデ



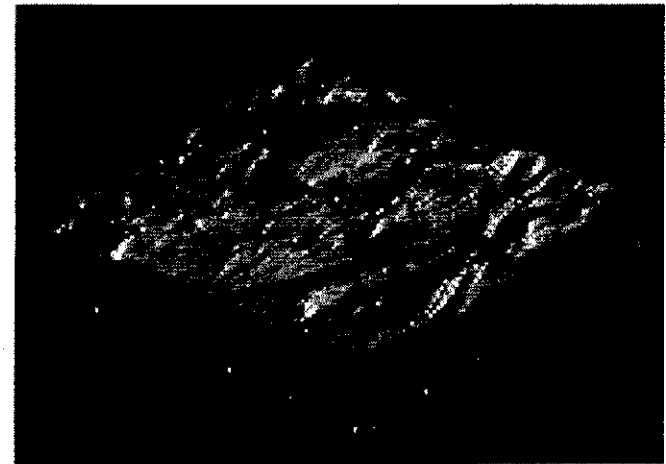
(a) Sample ① ($20 \times 20 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.17 \mu\text{m}$)



(b) Sample ② ($20 \times 20 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.16 \mu\text{m}$)



(c) Sample ③ ($20 \times 20 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.13 \mu\text{m}$)



(d) Sample ④ ($5 \times 5 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.024 \mu\text{m}$)

Fig.4 Perspective Pictures of Measured Date by AFM (オリジナルはカラー出力)

リアによるパレル加工であっても、前加工が研削加工であるか、三角柱メディアのパレル加工であるかによって平滑化の様相が異なっていることである。もちろん、図2や図3の高さ方向の拡大率や等高線のきざみ幅が σ により正規化されており異なっていることも配慮しなければならないが、定性的にも異なっていることは、加工により影響を受ける表面層の問題も含めて今後さらに研究する必要があるところである。

3.2 高さパラメータ

表5は、表1および表2に示した試料と測定条件の組み合わせによって得られた測定データを処理した結果得られた高さのパラメータの平均値である。表より、初期の研削加工面の表面おうとつの高さは、パレル加工①の三角柱メディアにより、より大きな変動に変えられたこと、一方パレル加工②の球形メディアによっては、その前のパラメータと大きな変動は無く、若干平滑化されることが高さのパラメータから読み取れる。

Table.5 Results of Height Parameters

Measurement Condition	Sample	R_{a-v} (μm)	σ (μm)
(a)	①	2.28	0.31
	②	4.38	0.42
	③	1.36	0.16
	④	3.36	0.35
(b)	①	1.46	0.24
	②	3.00	0.37
	③	0.82	0.11
	④	2.62	0.29

3.3 AFMによるさらに微細な領域の測定

前節までの測定は粗さ計のスタイラス (先端半径 $2 \mu\text{m}$, 荷重 0.7mN) を用いた測定結果であった。通常は機械加工面の微細なおうとつ形状の平均傾斜が 10° 程度までと緩やかであるため、前述の図や表5に示すような μm オーダの微細形状測定も粗さ計などで十分測定可能とされ、実際に行われている。しかしここではより微細な形状がどうなっているかをAFMにより測定してみた。AFMにとってはむしろ粗すぎる対象ではあるが、粗さ計スタイラスより2桁小さい先端半径から得られる情報によって、よりマイクロな特徴をとらえることとした。図4は図2と同様にAF

Mによって測定された情報をシェーディング処理して射影図表示したものである。特徴的な部分を示しているため、それぞれの測定領域の大きさは異なっている。(a)の研削加工では、中央の谷部の周辺に研削砥粒の切り込み時に試料の一部がカエリのように取り残されたり引き離された時生成されたと思われる部分が存在する。(b)のパレル加工①では、三角柱メディアのランダムな方向の衝突痕の様子がより詳細に判る。(c)のパレル加工②では、(a)の研削加工の山に相当する部分が球形メディアの衝突によってランダムなおうとつになっている。一方、谷の底の部分は大きな変化はなく、メディアとの衝突の有無による微細形状の様相の違いを確認することが出来る。(d)のパレル加工③では、(a)から(b)への変化と同様に、(c)で生成されたランダムな比較的大きなおうとつの山の部分がより微細でより平坦なおうとつに変化している。それに比べ、谷の部分の変化はあまり無く、これもメディアとの衝突の有無による微細形状の様相の違いと考えることが出来る。

これらは、図2や図3に結果を示した方法ではなかなかとらえることのできないものであり、手法を変えて測定することの有効性が確認できる。ただし、対象表面のおうとつの振幅が大きいと、形状の傾斜の急な部分においては、AFMのプローブの側面が試料に接触することも考えられ、またオーバーハングしたような部分は測定できない。

4. 考 察

研削加工表面は、砥粒による高速な削り取りにより、周辺に大きな加工硬化層や残留応力層を誘起する。その表面がさらにパレル加工されると、表面近傍におけるメディアとの衝突によって圧痕と、その周辺の塑性変形部が生成される。

三角柱メディアにおいては、衝突の際のエネルギーが大きく、したがって深い圧痕が生成されるとともに、周辺のひずみも大きく、大きな加工硬化や残留応力が引き起こされる。

一方、球形メディアによるパレル加工では、衝突の際のエネルギーが小さく、浅い圧痕となる。したがって三角柱メディア程ひずみも大きくなく、加工硬化や残留応力も小さいことが予想される。

この事によって、研削加工面は三角柱メディアによってはその全容が変化するほど大きく塑性変形し、一方球形メディアによってはその一部のみが変化するような塑性変形をもたらしたと考えることが出来る。

さらに、三角柱メディアによるパレル加工の後に球形メディアによるパレル加工を施した際の平滑化のメカニズムも定性的に理解できる。

5. おわりに

図5は試料④の測定条件(a)の射影図であり、図2(d)をより広く測定したものに対応する。この図から、パレル加工がより広い視野から見ればランダムで、部分的に深い溝を形成していることが判る。

本研究では、パレル加工によって形作られる表面微細形状の特徴を、粗さの評価に一般に用いられている触針式センサとAFMを用いて、高精度に三次元測定し、得られた結果を視覚表示して比較するとともに、パレル加工の条件との関係を明らかにした。本研究をまとめると、以下ようになる。

- (1)平面研削加工によって、表面は研削方向に強い方向性を有するテクスチャとなる。各切れ刃によるカエリ等は粗さ計触針では認められなかったが、AFMでは一部にその痕跡を確認できた。
- (2)平面研削加工面に三角柱メディアによるパレル加工を施した面では、メディアのエッジの衝突によって生成された打痕がランダムに存在する。各打痕周辺の盛り上がりなど、表面近傍の塑性変形の様子は粗さ計触針でも確認でき、AFMではより明瞭に判断できる。
- (3)平面研削加工面に球形メディアによるパレル加工を施した面では、研削によって作られた強い方向性を有する全体の大きな特徴は保存され、しかしながら、その筋目は特に高い部分が球形メディアの衝突によりランダムになり、弱められる。
- (4)三角柱メディアによるパレル加工の後に球形メディアによるパレル加工を施した面においても、三角柱の衝突による打痕のマクロな様相は弱められながらも保存され、なおかつ球形メディアの衝突によって全体がより微細なおうとつに平滑化されている。

今後、より詳細に検討するためには、単独の加工前後の状態を比較したり、微細な領域下の応力の状態を分析するなど、さらに詳細な実験的裏付けとそれに基づいたシミュレーションが必要であろう。

文 献

- 1)赤松良信：転がり軸受における表面キャラクタリゼーション,精密工学会誌,Vol.61, No.11(1995),1525.
- 2)中原綱光ほか：流体潤滑特性に及ぼす表面粗さの影響に関する実験的研究,潤滑,Vol.23, No.4(1983),294.