

令和三年度 修士論文

圧縮加工による超平滑面創成と 工具表面状態の影響

指導教員 松井 正仁 准教授

三重大学大学院 工学研究科 博士前期課程
物理工学専攻 ナノプロセッシング研究室

水野 元揮

目次

第 1 章 緒論	1
第 2 章 実験方法	3
2.1 供試材と試験片	3
2.1.1 供試材	3
2.1.2 試験片の製作	3
2.2 圧縮試験工具	6
2.2.1 圧縮試験工具の製作	6
2.2.2 TiN コーティング	11
2.2.3 TiN コーティングによる表面状態への影響	11
2.3 圧縮試験	13
2.3.1 圧縮試験装置	13
2.3.2 圧縮試験条件	14
2.4 触針式表面粗さ計(Surfest SJ-400)による評価方法	17
2.5 原子間力顕微鏡(AFM)による観察方法	18
2.6 工具表面の撮影方法	20
2.7 有限要素法(FEM)解析	23
2.7.1 解析モデルと条件	23
2.7.2 摩擦係数 μ の決定方法	23
2.7.3 相対すべり量 L_S と工具接触面圧 p の計算	25
第 3 章 圧縮加工による平滑化挙動	26
3.1 TiN コーティング工具 Tool-1($R_a=10\text{nm}$), A1050-H における実験結果	28
3.1.1 圧縮率と表面粗さの関係	28
3.1.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	30
3.1.3 有限要素法(FEM)解析結果	34
3.2 TiN コーティング工具 Tool-1($R_a=10\text{nm}$), C1020-O における実験結果	36
3.2.1 圧縮率と表面粗さの関係	36
3.2.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	38
3.2.3 有限要素法(FEM)解析結果	42
3.3 TiN コーティング工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), C1020-O における実験結果	44
3.3.1 圧縮率と表面粗さの関係	44
3.3.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	46

3.3.3	有限要素法(FEM)解析結果	50
3.4	加工硬化の影響	52
3.4.1	圧縮率と表面粗さの関係	52
3.4.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	55
3.4.3	有限要素法(FEM)解析結果	60
3.5	工具表面粗さの影響	63
3.5.1	圧縮率と表面粗さの関係	63
3.5.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	65
3.5.3	有限要素法(FEM)解析結果	69
3.6	材料の影響	71
3.6.1	圧縮率と表面粗さの関係	71
3.6.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	74
3.6.3	有限要素法(FEM)解析結果	81
3.7	工具表面膜種の影響	85
3.7.1	圧縮率と表面粗さの関係	86
3.7.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	89
3.7.3	有限要素法(FEM)解析結果	95
第4章	加工品表面のフラクタル解析	101
4.1	フラクタルの説明	101
4.2	フラクタル次元の決定法	103
4.2.1	零点集合次元	103
4.2.2	パワースペクトル次元	104
4.3	AFM システムにおけるフラクタル次元の測定法	107
4.3.1	零点集合次元 D_Z の測定法	107
4.3.2	パワースペクトル次元 D_{PS} の測定法	110
4.4	TiN コーティング工具 Tool-1($R_a=10\text{nm}$), A1050-H における解析結果	110
4.4.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	110
4.4.2	パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果	112
4.5	TiN コーティング工具 Tool-1($R_a=10\text{nm}$), C1020-O における解析結果	113
4.5.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	113
4.5.2	パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果	115
4.6	TiN コーティング工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), C1020-O における解析結果	116
4.6.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	116
4.6.2	パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果	117
4.7	加工硬化の影響	119

4.7.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	119
4.7.2	パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果	123
4.8	工具表面粗さの影響	131
4.8.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	131
4.8.2	パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果	134
4.9	材料の影響	139
4.9.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	139
4.9.2	パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果	143
4.10	工具表面膜種の影響	151
4.10.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	151
4.10.2	パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果	155
第5章 結論		164
参考文献		166
謝辞		169

第1章 緒論

近年、様々な分野において製品の小型化が進み、高い精度と品質が求められている。製品を構成する個々の部品は関係する部品相互に表面を介して組付けられるため、製品の小型化が進むほど個々の部品の表面機能が重要な意味を持つ。さらに、それらの表面機能は表面加工によって得られる加工表面特性によって支配される⁽¹⁾。表面仕上げには一般に研磨加工が用いられるが、材料ロスが生じることや加工に時間が必要となるなど生産性に問題がある。そこで低コストで大量生産が可能な塑性加工によって平滑面の創成を行うことで生産性の向上を図ることができる。

これまで金属表面における平滑化に関する研究は、中村ら⁽²⁾の塑性加工における表面平滑化条件に関する研究、村岡ら⁽³⁾のアルミニウム合金棒材の超平滑化に関する研究、H.B.Xieら⁽⁴⁾の鋼を冷間圧延するときの板厚減少率などの表面粗さへの影響に関する研究、H.J.Liらのアルミニウムを単軸圧縮するときの潤滑剤の有無が表面粗さに及ぼす影響を調べた研究⁽⁵⁾、単軸圧縮加工における焼鈍したアルミニウム合金の表面平滑化の微細構造での解析に関する研究⁽⁶⁾、冷間単軸圧縮加工における表面平滑化の摩擦の影響に関する研究⁽⁷⁾、日暮ら⁽⁸⁾のテンプレートストリッピングによる接合面平滑化に関する研究、仙波ら⁽⁹⁾の超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の研削加工における工具と金型の表面粗さに関する研究、M. Okadaら⁽¹⁰⁾のステンレス鋼に対する工具回転型バニシング加工に関する研究、Y. Zhengら⁽¹¹⁾の高速三次元研磨による単結晶ダイヤモンドの平滑化に関する研究、C.Liら⁽¹²⁾のGaN結晶の切削加工における表面粗さと塑性変形メカニズムに関する研究がなされている。

これまでにナノプロセッシング研究室では塑性加工の中でも最も基本的な加工法である単軸圧縮加工における超平滑面の創成を目的とし、様々な研究を行ってきた。まず、平滑面創成のために用いる工具表面の研磨方法を確立し、表面粗さ計、AFM、FEM解析、フラクタル解析による評価方法の確立を行った^{(13)~(15)}。工具表面と試験片の間の金属接触を避けるために $R_a=10\text{nm}$ と $R_a=5\text{nm}$ の工具に厚さ 10nm のカーボン蒸着を施し、A1050-HとA1050-Oの圧縮試験を行ったところ、 $R_a=5\text{nm}$ では圧縮率30%以上でカーボン蒸着膜の剥離面積が大きくなり平滑化が進まないのに対し、 $R_a=10\text{nm}$ では圧縮率30%以上でも剥離の影響を受けず平滑化が進むことがわかった^{(16)~(17)}。菜種油を潤滑剤としてA1050-HとA1050-Oの圧縮試験を行ったところ、カーボン蒸着と比べオイルビットの影響により測定箇所によるばらつきが大きくなることがわかった^{(18)~(19)}。カーボン蒸着膜の厚さの影響を調べるため、 $R_a=10\text{nm}$ 、 5nm の工具に厚さ $t=10\text{nm}$ 、 20nm 、 40nm 、 100nm のカーボン蒸着を施し、A1050-HとA1050-Oの圧縮試験を行ったところ、 $t=40\text{nm}$ 以上で剥離が発生しにくく、膜厚は 40nm ほどが適切であることがわかった^{(18)~(22)}。DLC（ダイヤモンドライクカーボン）コーティングを $R_a=10\text{nm}$ と $R_a=5\text{nm}$ の工具に施しA1050-HとA1050-Oの圧縮試験を行った場合、加工硬化の違いによる影響を比較すると工具表面粗さによらず低圧縮率のときに変形抵抗の大きいA1050-Hの方がA1050-Oよりも平滑化が進むことがわかった。A1050-Oでは圧縮率が

大きくなるほど平滑化が進むのに対し、A1050-H では工具表面状態の悪化が生じるため、高圧縮率のときに A1050-O の方が A1050-H よりも平滑化が進むことがわかった。工具表面粗さの違いによる影響を比較すると $R_a=10\text{nm}$ の工具では圧縮が進むと初期工具と同程度の平滑度が得られるが、 $R_a=5\text{nm}$ の工具では初期工具ほどの平滑度が得られないことがわかった^{(19), (21)}。硬度は低いが高密着性の高い DLC-B を $R_a=10\text{nm}$ の工具に施し A1050-H の圧縮試験を行ったところ、DLC-B の低圧縮率では他の膜種に比べて平滑化が進まないが、高圧縮率の外周部において DLC と同程度まで平滑化が進むことがわかった⁽²²⁾。 $R_a=10\text{nm}$ と $R_a=5\text{nm}$ の工具に DLC コーティングを施し C1020-H と C1020-O の圧縮試験を行った場合、加工硬化の違いによる影響を比較すると $R_a=10\text{nm}$ では低圧縮率において平滑度に大きな違いは見られず、高圧縮率の中心部では C1020-O の方が平滑化が進むことがわかった。 $R_a=5\text{nm}$ では測定箇所によらず低圧縮率で C1020-H の方が平滑化が進み、高圧縮率では平滑度に大きな違いは見られないことがわかった^{(23), (24)}。工具表面粗さの違いによる影響を比較すると、 $R_a=5\text{nm}$ の工具の方が明らかに平滑化が進み、特に低圧縮率において差が大きく、圧縮率が大きくなるにつれてその差は小さくなることがわかった。 $R_a=10\text{nm}$ 、 $R_a=5\text{nm}$ とともに外周部ほど材料流動によるしごき効果により平滑化が進み、 $R_a=10\text{nm}$ では圧縮が進むと初期工具と同程度の平滑度が得られるが、 $R_a=5\text{nm}$ では初期工具ほどの平滑度が得られないことがわかった^{(23), (24)}。材料の影響を比較するため A1050-H と A1050-O の結果と比較すると、いずれの条件においても変形抵抗の大きい無酸素銅の方がアルミニウムよりも中心部において平滑化が進み、高圧縮率では大きな差は見られないことがわかった^{(23), (24)}。 $R_a=10\text{nm}$ の工具に TiN(チタンナイトライド)コーティングを施し A1050-O の圧縮試験を行い、 $R_a=5\text{nm}$ の工具に TiN コーティングを施し A1050-H と A1050-O の圧縮試験を行ったところ、DLC と比較すると TiN の方が測定箇所による平滑度の差が小さく、中心部の低圧縮率でより平滑化が進むことがわかった⁽²⁵⁾。 $R_a=10\text{nm}$ と $R_a=5\text{nm}$ の工具に TiN コーティングを施し C1020-H の圧縮試験を行ったところ、DLC と比較すると $R_a=10\text{nm}$ において低圧縮率の中心部では TiN の方が平滑化が進み、高圧縮率では違いは見られなかった。 $R_a=5\text{nm}$ では圧縮率、測定箇所によらず平滑度に大きな差は見られなかった⁽²⁴⁾。

本研究では、 $R_a=10\text{nm}$ の工具に TiN コーティングを施し A1050-H の圧縮試験を行い、過去の実験結果と比較することで加工硬化、工具表面粗さ、材料、工具表面膜種の違いによる影響を検討した。また $R_a=10\text{nm}$ と $R_a=5\text{nm}$ の工具に TiN コーティングを施し C1020-O の圧縮試験を行い、結果の比較をすることで工具表面粗さの違いによる影響を検討し、過去の実験結果と比較することで加工硬化、材料、工具表面膜種の違いによる影響を検討した。実験結果の検討では、触針式表面粗さ計を用いて工具および圧縮前後の試験片表面を算術平均粗さ R_a によって評価し、原子間力顕微鏡(AFM)を用いた試験片表面の観察による粗さの評価を行った。また、有限要素法(FEM)解析を用いて工具と材料間の相対すべり量と平滑度の関係、面圧と平滑度の関係を検討した。さらに、工具および試験片表面の凹凸形状の複雑さについて検討するために、工具と試験片表面のフラクタル解析による評価も行った。

第2章 実験方法

本研究では加工硬化，工具表面粗さ，材料，工具表面膜種による影響を検討するため $R_a=10\text{nm}$ の工具に TiN (Titanium Nitride) コーティングを施し，アルミニウムの引抜き材の圧縮試験， $R_a=10\text{nm}$ ， 5nm の工具に TiN コーティングを施し，無酸素銅の焼きなまし材の圧縮試験を行った．圧縮試験前後の試験片表面を触針式表面粗さ計および原子間力顕微鏡 (AFM) で測定して評価を行った．そして，有限要素法 (FEM) 解析を用いて超平滑面創成挙動に影響を及ぼす因子の一つである材料流動の違いによる平滑化への影響を調査した．

本章では，実験方法および実験条件，各解析の手順を示す．

2.1 供試材と試験片

2.1.1 供試材

本実験では供試材としてアルミニウム引抜き材(A1050BD-H14)と銅引抜き材 (C1020BD-H) を用いた．Table 2.1 にアルミニウム引抜き材の化学成分，Table 2.2 に銅引抜き材の化学成分と機械的性質を示す．

Table 2.1 アルミニウム引抜き材(A1050BD-H14)の化学成分

Material	Cu / %	Si / %	Fe / %	Mn / %	Mg / %	Zn / %	Cr / %	Ti / %	Al / %
A1050-BD	0.01	0.09	0.12	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	99.74

Table 2.2 銅引抜き材 (C1020BD-H) の化学成分と機械的性質

Material	Cu / %	O / %	Tensile strength / MPa
C1020BD-H	99.99	0.0001	389

2.1.2 試験片の製作

供試材より，直径 7mm，高さ 100mm の円筒を旋削し，マイクロソー（笠井商工株式会社製，RCA-005）を用いて板厚が 0.9mm になるように切断した．マイクロソーによる試験片の切断については上江洲⁽²⁶⁾に基づき行った．切断後，#1500 のサンドペーパーと粒径 $3\mu\text{m}$ のアルミナ（株式会社フジミンコーポレーテッド製）を砥粒としたナイロクロス（リファインテック株式会社製，直径 200mm）で圧縮表面を研磨して板厚を 0.8mm として試験片とした．試験片の算術平均粗さは $R_a=80\text{nm}$ となるよう研磨した．研磨方法については脇⁽²⁷⁾に基づき作成を行った．また，Fig.2.1 に試験片の寸法，Fig.2.2 に試験片の外観，Fig.2.3 に試験片表面の AFM 像の例，Fig.2.4 に試験片表面の断面曲線を示す．

なお，銅の焼きなまし処理は，試験片をアルミホイルで包み，カンタル坩堝炉（東海高熱工業株式会社製）を用いて 385°C で 1 時間加熱し，その後室温で冷却した．

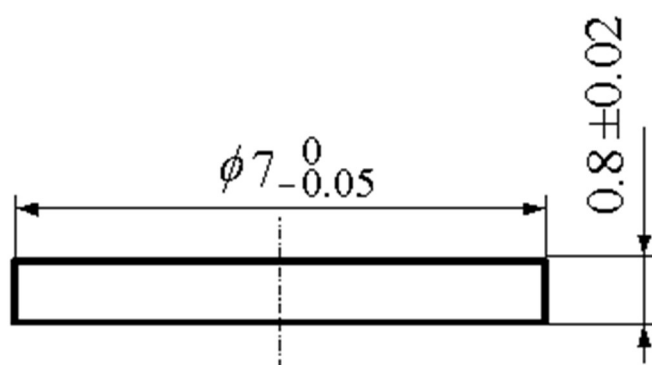
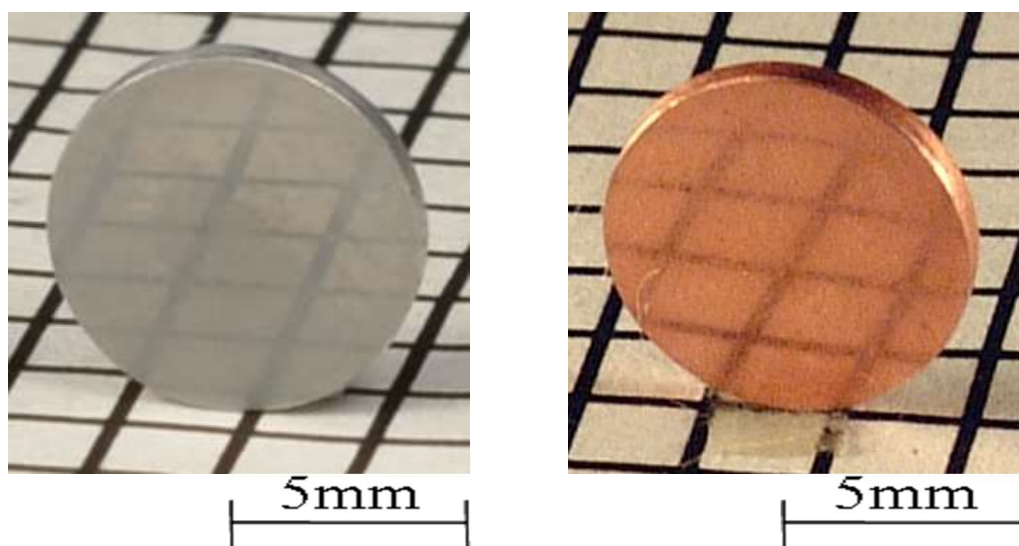


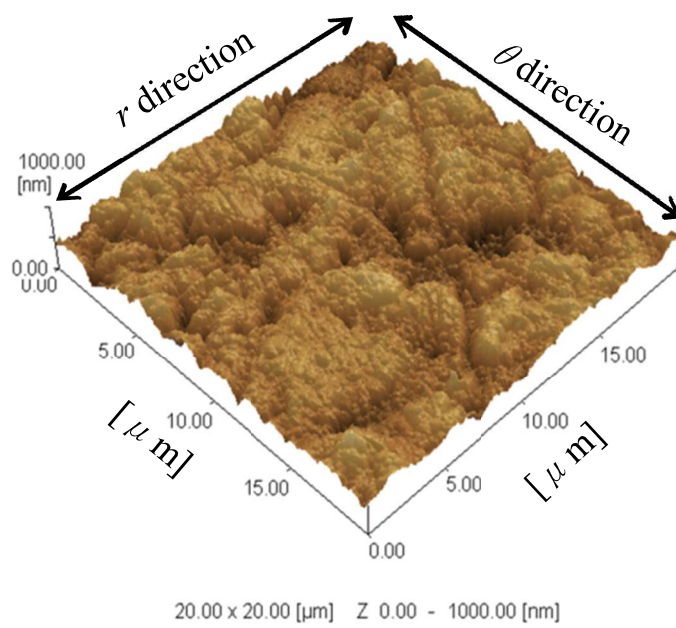
Fig.2.1 試験片の寸法



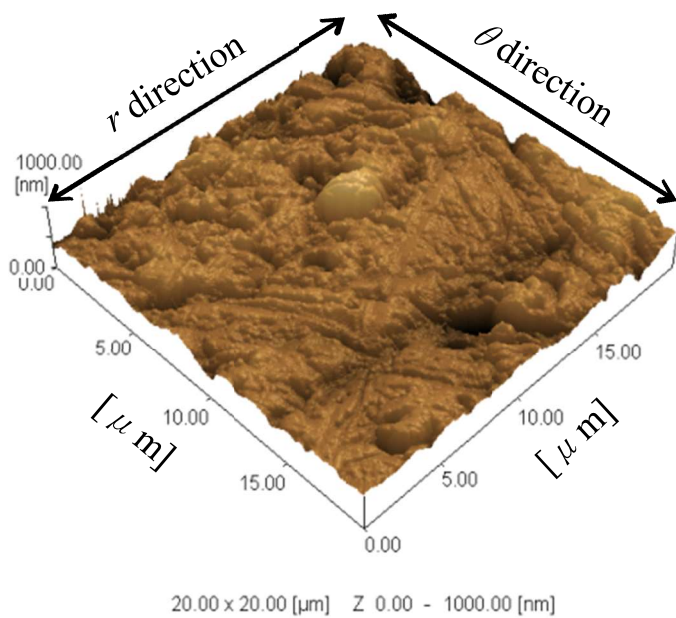
(a) アルミニウム

(b) 銅

Fig.2.2 初期試験片の外観 ($e_c=0\%$, $R_a=80\text{nm}$)

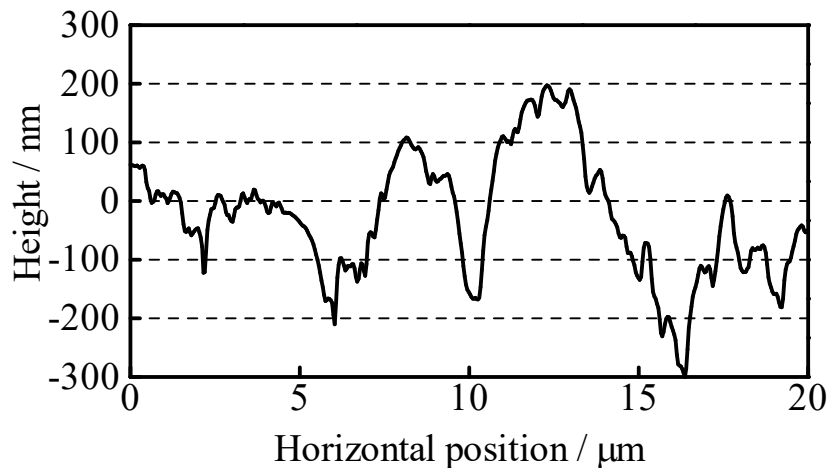


(a) アルミニウム

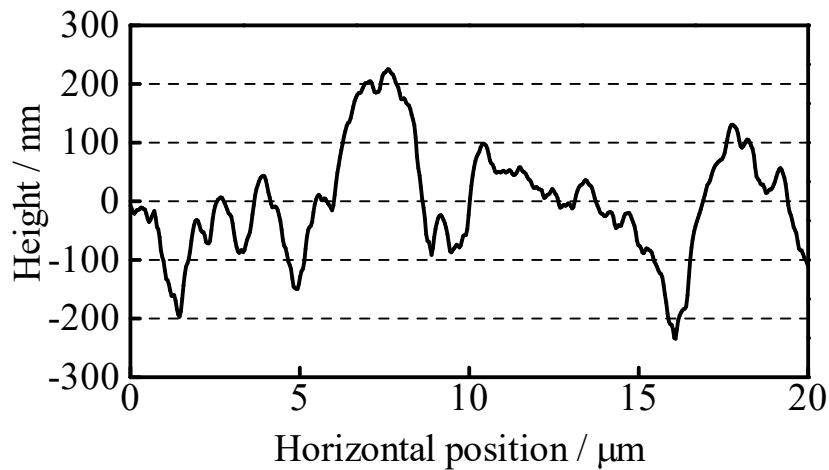


(b) 銅

Fig.2.3 初期試験片表面の AFM 像 ($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)



(a) アルミニウム



(b) 銅

Fig.2.4 初期試験片表面の断面曲線

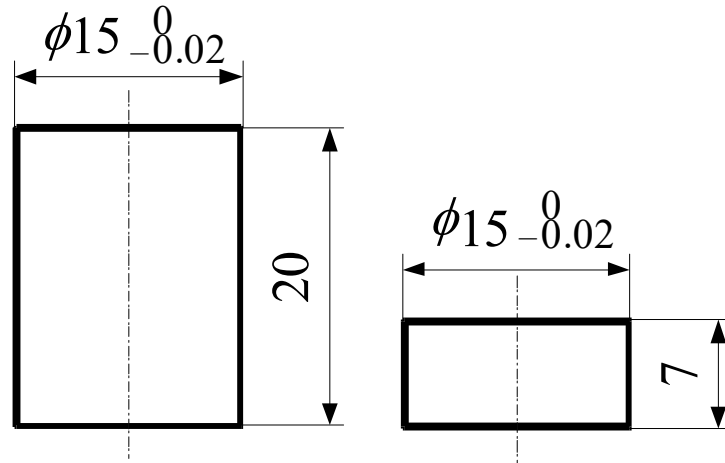
2.2 圧縮試験工具

2.2.1 圧縮試験工具の製作

本研究では表面粗さの異なる工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$), Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) を使用した. Fig.2.5 に工具の寸法を示す. Fig.2.6 に圧縮試験に用いた工具 Tool-1 の製作手順と各工程終了後の圧縮部表面の算術平均粗さ R_a の目安を, Fig.2.7 に圧縮試験に用いた工具 Tool-2 の製作手順と各工程終了後の圧縮部表面の算術平均粗さ R_a の目安を示す. 研磨方法については脇⁽²⁸⁾に基づき製作を行った. なお, 本研究ではオネストン株式会社に依頼した工具を使用した. 工具は SKD11 鋼, 焼き入れ硬さ HRC60~62 であり, 納入時には表面に研削を施した状態であった. このときの工具表面の最大高さ粗さは $R_z=0.95\mu\text{m}$ である.

Fig.2.8 に研磨後の Tool-1 工具の外観, Fig.2.9 に Tool-1 工具表面の AFM 像, Fig.2.10 に Tool-1 工具表面の断面曲線, Fig.2.11 に研磨後の Tool-2 工具の外観, Fig.2.12 に Tool-2 工具

表面の AFM 像, Fig.2.13 に Tool-2 工具表面の断面曲線を示す.



(a) 上工具

(b) 下工具

Fig.2.5 工具の寸法

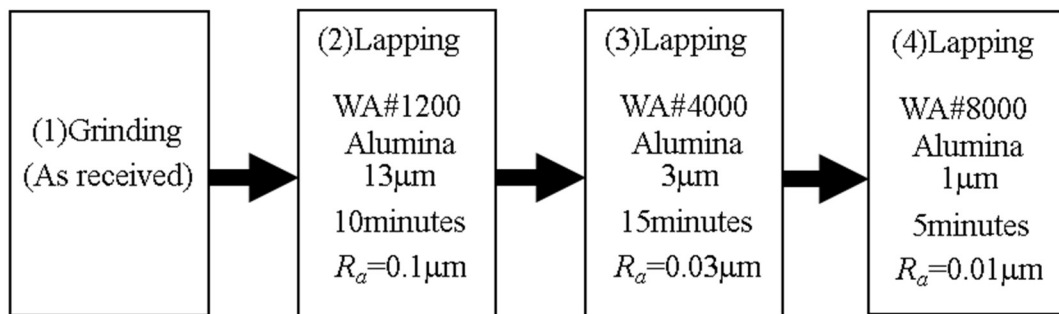


Fig.2.6 工具の製作手順 (Tool-1)

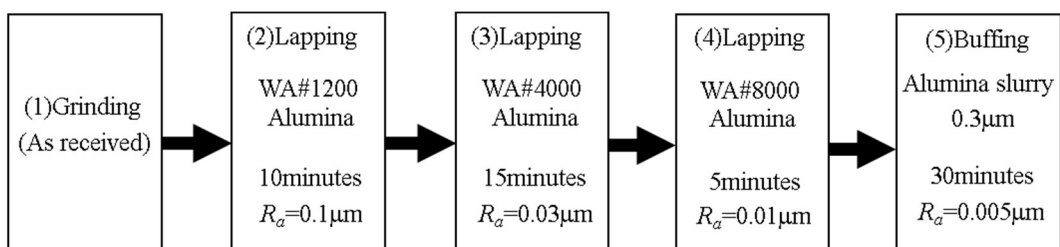


Fig.2.7 工具の製作手順 (Tool-2)

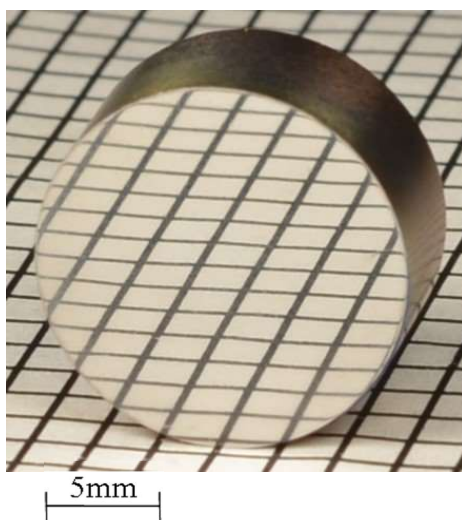


Fig.2.8 研磨後の工具表面 (Tool-1)

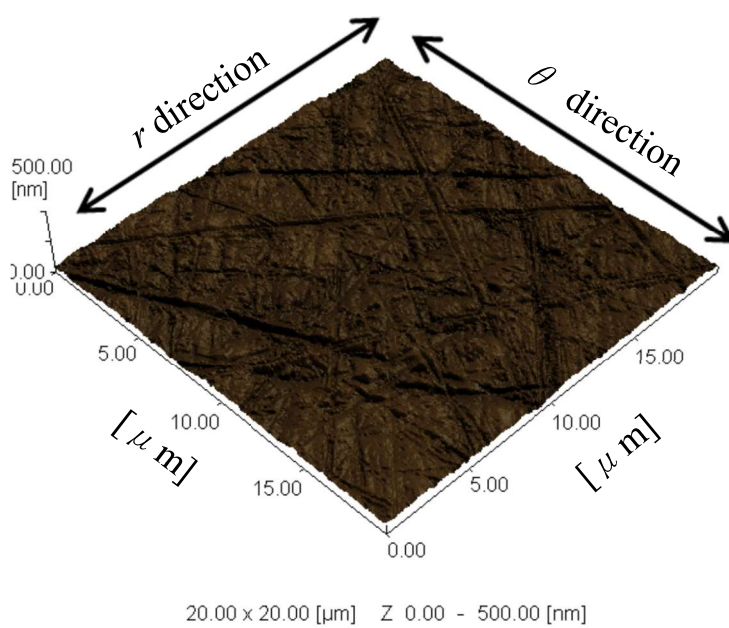


Fig.2.9 工具表面の AFM 像 ($SR=20\mu\text{m}$, Tool-1)

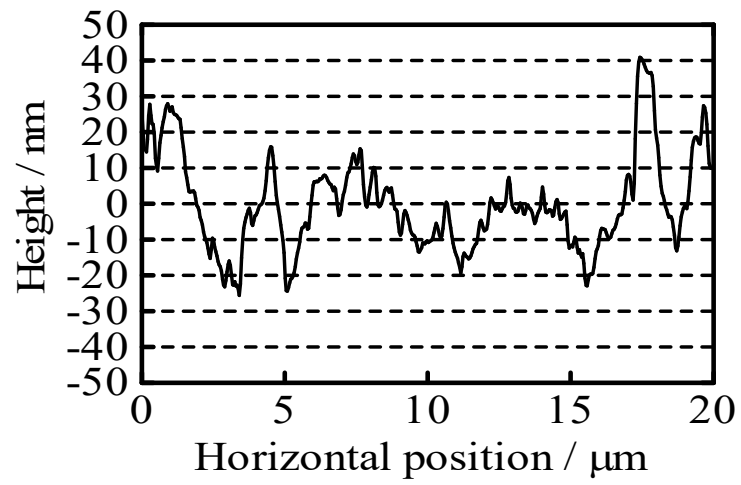


Fig.2.10 工具表面の断面曲線 (Tool-1)



Fig.2.11 研磨後の工具表面 (Tool-2)

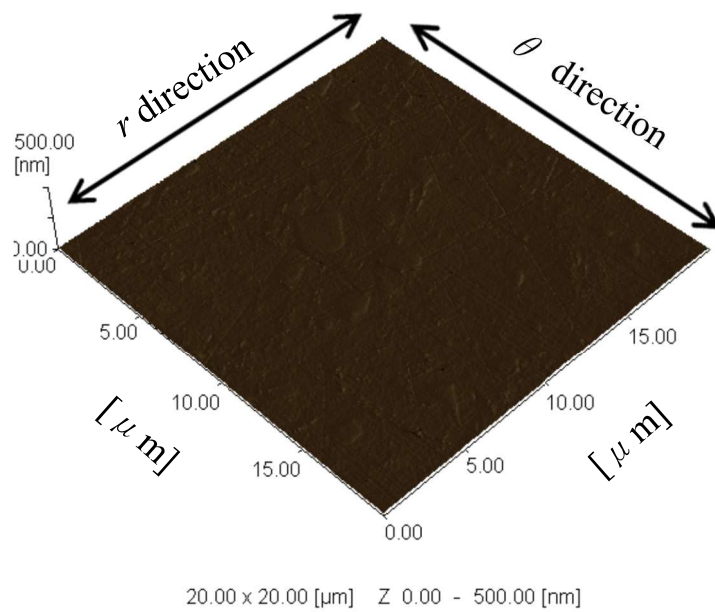


Fig.2.12 工具表面の AFM 像 ($SR=20\mu\text{m}$, Tool-2)

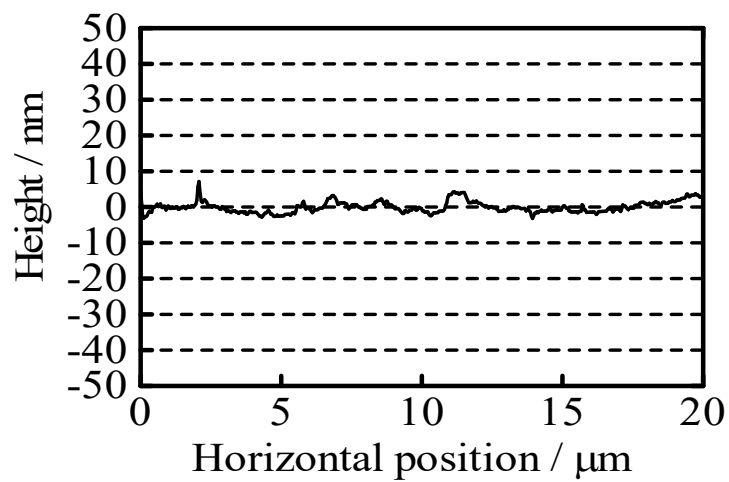


Fig.2.13 工具表面の断面曲線 (Tool-2)

2.2.2 TiN コーティング

工具への密着性，耐摩耗性に優れた TiN コーティングを固体潤滑膜として採用した．工具への TiN コーティングは，東邦化研株式会社に依頼した．今回用いた TiN コーティングの仕様を Table 2.3 に示す．

Table2.3 TiN コーティングの仕様

硬度 (Hv)	膜厚 (nm)	摩擦係数	面粗度 R_z (μm)
>2000	100	0.2~0.25	基材と同程度

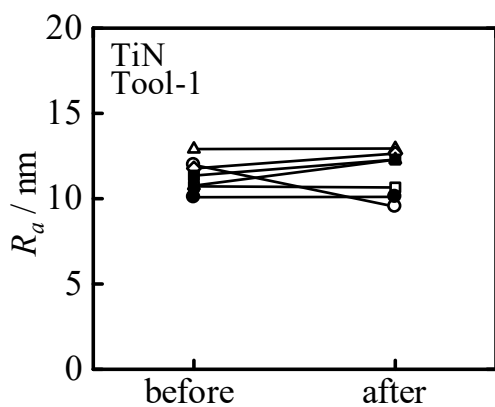
色調	特徴	適用基材	用途
黄金色	工具への密着性，耐摩耗性に優れる	超硬一般鋼	加工用工具・金型

2.2.3 TiN コーティングによる表面状態への影響

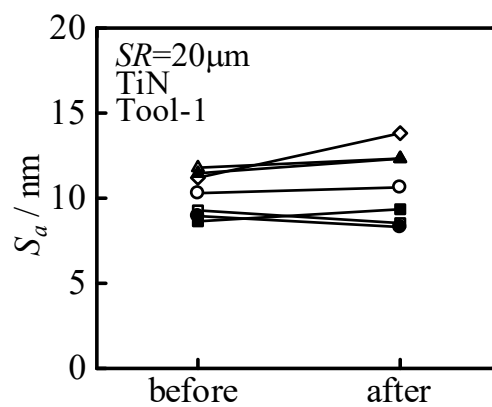
工具に TiN コーティングを行った際の工具表面状態への影響を調べるため，コーティング前後の各種データの比較を行った．

Fig.2.14 に TiN コーティングの膜厚を $t=100\text{nm}$ とした工具 Tool-1 のコーティング前後の算術平均粗さ R_a ，算術平均面粗さ S_a ，零点集合次元 D_z およびパワースペクトル次元 D_{PS} を示す． D_z および D_{PS} については 4 章で詳述する．コーティング後に， R_a ， S_a とともに若干小さくなる場合がある．また， D_z は僅かに小さくなる傾向にあり， D_{PS} はばらつきが大きくなり，値も僅かに大きくなる．

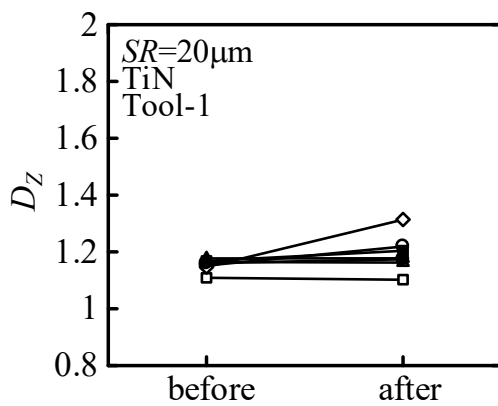
Fig.2.15 に TiN コーティングの膜厚を $t=100\text{nm}$ とした工具 Tool-2 のコーティング前後の算術平均粗さ R_a ，算術平均面粗さ S_a ，零点集合次元 D_z およびパワースペクトル次元 D_{PS} を示す．コーティング後に， R_a ， S_a とともに若干大きくなる場合がある．また， D_z は僅かに小さくなる傾向にあり， D_{PS} はばらつきが大きくなり，値も僅かに大きくなる．



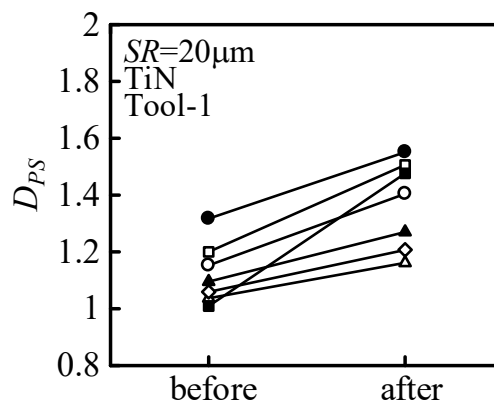
(a) TiN コーティング前後の
算術平均粗さ R_a



(b) TiN コーティング前後の
算術平均面粗さ S_a



(c) TiN コーティング前後の
零点集合次元 D_z



(d) TiN コーティング前後の
パワースペクトル次元 D_{ps}

Fig.2.14 TiN コーティング工具 (Tool-1)

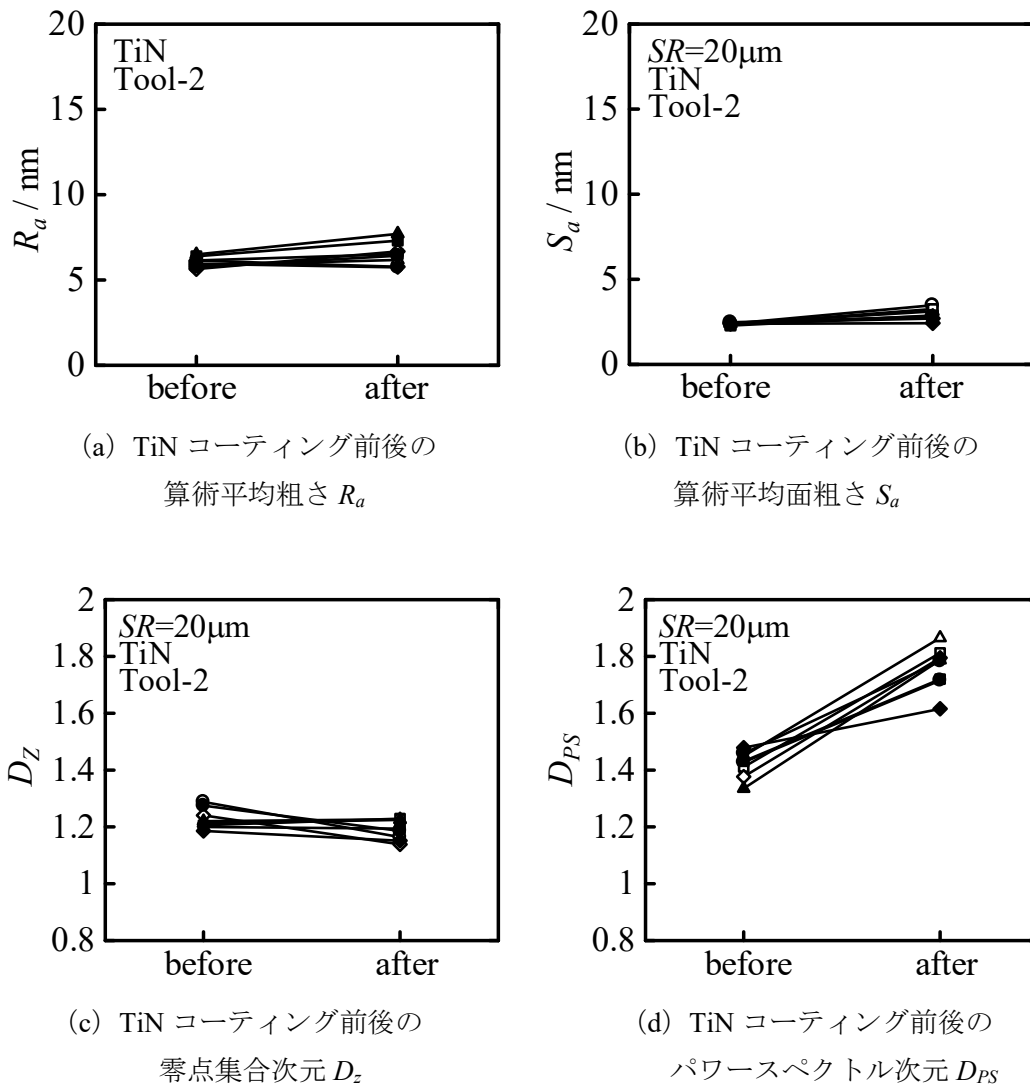


Fig.2.15 TiN コーティング工具 (Tool-2)

2.3 圧縮試験

圧縮試験では、工具表面に TiN コーティングを施し実験を行った。圧縮試験の実験手順については脇⁽²⁹⁾に基づき実験を行った。

2.3.1 圧縮試験装置

圧縮試験における加圧装置には、万能試験機（島津製作所製，REH-50 型）を使用した。Fig.2.16 に圧縮試験装置の外観を示す。この試験機は、最大圧縮荷重として 9.8, 24.5, 49, 98, 245, 490kN の 6 段階のレンジがあり、最大で 490kN の負荷が可能である。また、圧縮板の最大間隔は 800mm, 圧縮荷重の最小目盛は各々の 1000 分の 1 となっており、圧縮速度は 0~80mm/min の間で調節可能である。上工具と下工具それぞれの圧縮工具は Fig.2.17 に示すようにダイセット（双葉電子工業製）に設置した。



Fig.2.16 万能試験機（島津製作所製，REH-50 型）

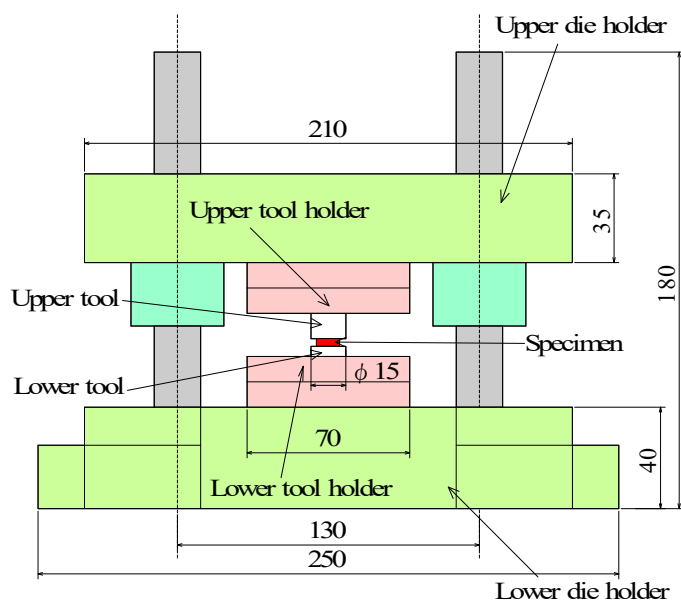


Fig.2.17 圧縮工具とダイセットの概略図

2.3.2 圧縮試験条件

本研究では、ひずみの表面形状への影響を調べるために圧縮率 e_c を変化させて実験を行った。圧縮率 e_c の算出は次式から行うものとする。

$$e_c = \frac{t_0 - t}{t_0} \times 100 \quad (\%) \quad (2.1)$$

(t_0 : 試験片初期板厚, t : 圧縮後試験片板厚)

圧縮試験時のひずみ速度は 2mm/min として実験を行った。

また、圧縮中の荷重と変位の変化を知るために万能試験機と変位測定器（ONO SOKKI 製 LINEAR GAUGE SENSOR GS-3830B）に接続したデジタルゲージ（ONO SOKKI 製 DIGITAL-ANALOG OUT GAUGE DG-5100）をレコーダー（NEC 製オムニエース II RA1200）につなぎ、出力される電圧を記録した。環状ばね型力計（東京試験機製作所製）とブロックゲージ（MITUTOYO 製 GAGE BLOCK SET）を用いてそれぞれ出力された電圧と荷重、電圧と変位量の校正を行った。

Fig.2.18 に変位測定器（ONO SOKKI 製 LINEAR GAUGE SENSOR GS-3830B）、Fig.2.19 にデジタルゲージ（ONO SOKKI 製 DIGITAL-ANALOG OUT GAUGE DG-5100）、Fig.2.20 に環状ばね型力計（東京試験機製作所製）の外観を、Fig.2.21 に万能試験機に環状ばね型力計（東京試験機製作所製）を設置し、レコーダー（NEC 製オムニエース II RA1200）を接続したときの外観を示す。校正については驚⁽³⁰⁾に基づいて行った。

その結果、荷重については

245 [kN]レンジの場合：荷重[N]=2560.6×出力電圧[mV]

98[kN]レンジの場合：荷重[N]=1022.3×出力電圧[mV]

49[kN]レンジの場合：荷重[N]=509.13×出力電圧[mV]

24.5[kN]レンジの場合：荷重[N]=256.88×出力電圧[mV]

の関係が得られた。

変位については「変位[mm]=0.9975×出力電圧[V]」の関係が得られた。



Fig.2.18 変位測定機（ONO SOKKI 製 LINEAR GAUGE SENSOR GS-3830B）



Fig.2.19 デジタルゲージ (ONO SOKKI 製 Digital Gauge Counter DG-5100)



Fig.2.20 環状ばね型力計の外観



Fig.2.21 環状ばね型力計設置時の外観

2.4 触針式表面粗さ計 (Surftest SJ-400) による評価方法

本研究では、触針式表面粗さ測定装置 (Surftest SJ-400) を用い、最大高さ粗さ R_z 、算術平均粗さ R_a の測定を行った。触針式表面粗さ測定装置 (Surftest SJ-400) の外観を Fig.2.22 に示す。触針式表面粗さ計は Fig.2.23 に示すように先端半径 2~10 μm 程度の触針で表面を直接トレースし、その触針の上下を差動トランスなどで電気的な信号に変換し、出力するものである。本装置の触針は、材質がダイヤモンド、先端半径が 2 μm 、先端角度が 60°である。触針式表面粗さ計 (Surftest SJ-400) の使用方法については脇⁽³¹⁾に基づき測定を行った。なお、本研究では測定速度を 0.05mm/s として測定を行った。



Fig.2.22 触針式表面粗さ計（Surftest SJ-400）の外観

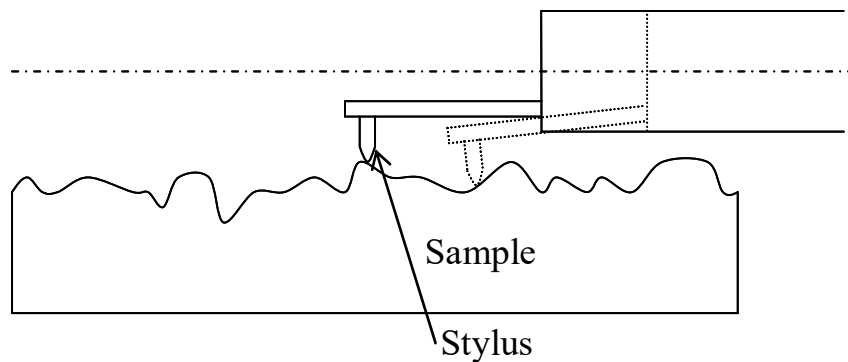


Fig.2.23 触針式表面粗さ計の原理図

2.5 原子間力顕微鏡（AFM）による観察方法⁽³²⁾

SPM (Scanning Probe Microscope) 装置とその周辺システムの外観写真を Fig.2.24 に示す。これらは本体 SPM9500J3 (島津製作所製), ホストコンピュータ (DELL 製 OPTIPLEX GX-150), カラーディスプレイモニター (MITSUBISHI 製 RD17GX II), 除振台 (MEIRITSU 製 AZ-S) から構成されている。

本研究では, 工具および試験片表面は圧縮試験前後に AFM 観察を行った。装置の使用手順については脇⁽³³⁾に基づき行った。走査範囲 SR は $20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$ ($SR=20\mu\text{m}$) とした。画像の解像度は最大 512×512 画素で出力される。試験片は工具と材料の相対すべり量による平滑化挙動の影響を調べるため, 圧縮試験後の表面の半径 $r=0, 1, 2, 3\text{ mm}$ の 4 箇所において測定を行った。AFM により表面観察を行う場所を Fig.2.25 に示す。

AFM による平滑度を表わす指標として, 算術平均粗さ R_a を 2 次元に拡張した算術平均面粗さを S_a と定義し, 評価を行った。また, 材料流動による方向性の違いを調べる際には断

面曲線から取得した算術平均粗さを算術平均粗さ相当値 R_{ae} と定義して評価した。 R_{ae} の測定については、各測定位置において Fig.2.25 に示すように r 方向（半径方向）と θ 方向（ r 方向に直角な方向（円周方向））を測定した。本研究で使用した試験片と工具は $SR=20\mu\text{m}$ において、試験片： $S_a=80\text{nm}$ ， $R_{ae}=75\text{nm}$ ，Tool-1 工具： $S_a=10\text{nm}$ ， $R_{ae}=10\text{nm}$ ，Tool-2 工具： $S_a=2\text{nm}$ ， $R_{ae}=2\text{nm}$ であった。

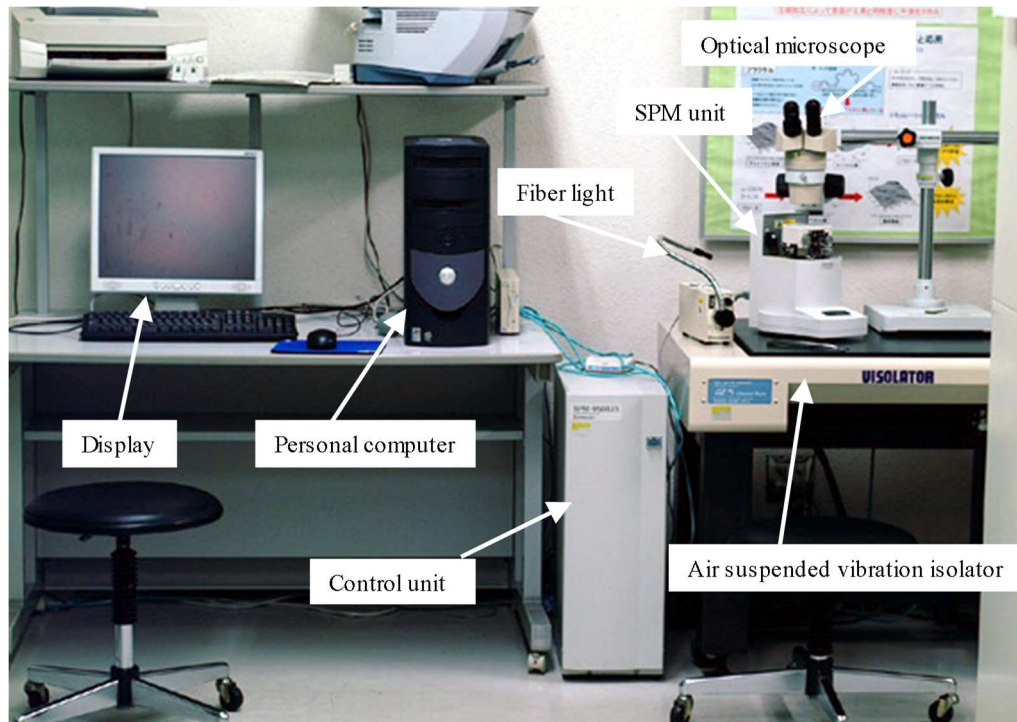


Fig.2.24 SPM 装置および周辺装置の外観

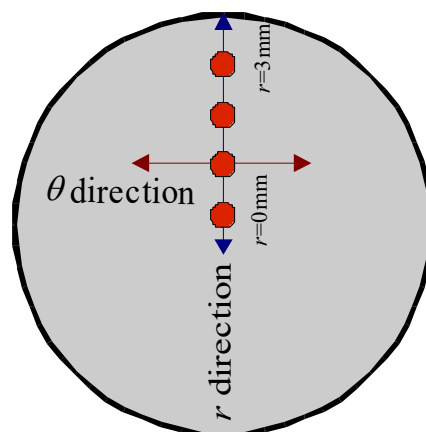


Fig.2.25 圧縮後試験片の AFM 観察を行う場所

2.6 工具表面の撮影方法

工具表面の外観について検討するために、実験後の工具表面の写真を撮影した。撮影方法については脇⁽³⁴⁾に基づき行った。圧縮後工具表面の外観写真を Fig.2.26 に示す。

デジタルカメラ（Nikon 製，D5100）とマイクロレンズ（Nikon 製，AF MICRO NIKKOR 60mm）を用意し，Fig.2.27 のようにコピースタンドに設置する。コピースタンド台の最奥から 15cm の位置（Fig.2.28 (a) a, b 点）にライトスタンドを設置する。両サイドのライトはライトスタンドのアームの根本から 40cm の位置（Fig.2.28 (a) c, d 点）に設置し，電球の先端がコピースタンドの 23cm のメモリの高さに合うようにした後，ライトスタンドのアームについているライト自体をそれぞれ下側に 45° に傾け設置する（Fig.2.28 (b)）。ライトスタンドのアームの根本をそれぞれ原点とし，左側のライトスタンドのアームは内側に 30°，右側のライトスタンドのアームは内側に 20° 傾け設置する。カメラはコピースタンドに固定し，スタンドの下端を 29cm に合わせて固定する（Fig.2.28 (b)）。

厚さ 1mm のガラス板を工具の下に置き，工具の直径の 3 分の 1 程度をガラス板にのせた状態で黒色のシートの上に載せ撮影し，反射板として白い紙を利用する。その様子を Fig.2.29 に示す。

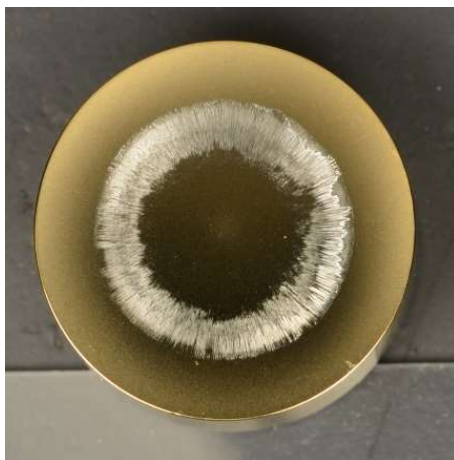
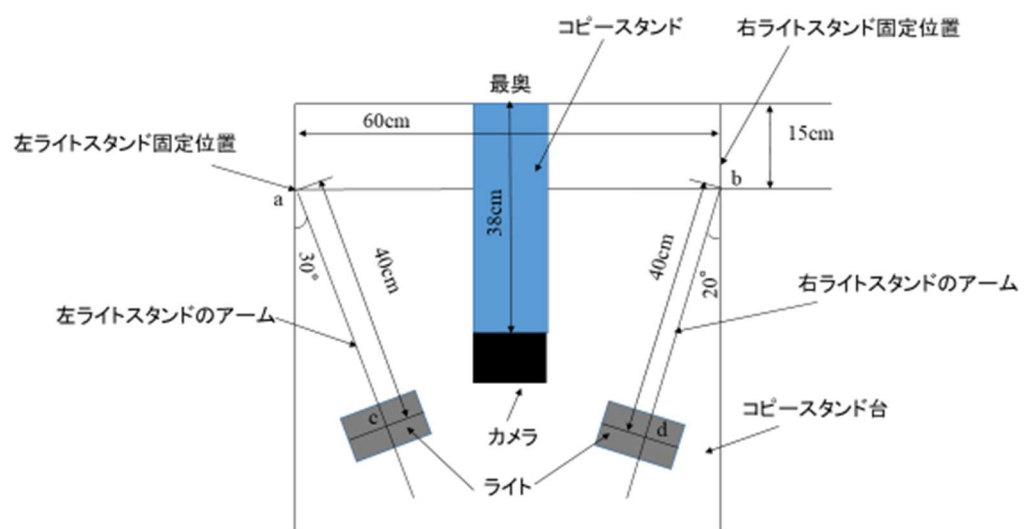


Fig.2.26 圧縮後工具表面のデジタルカメラ像の一例
(TiN, Tool-1, A1050-H, $e_c=53\%$)

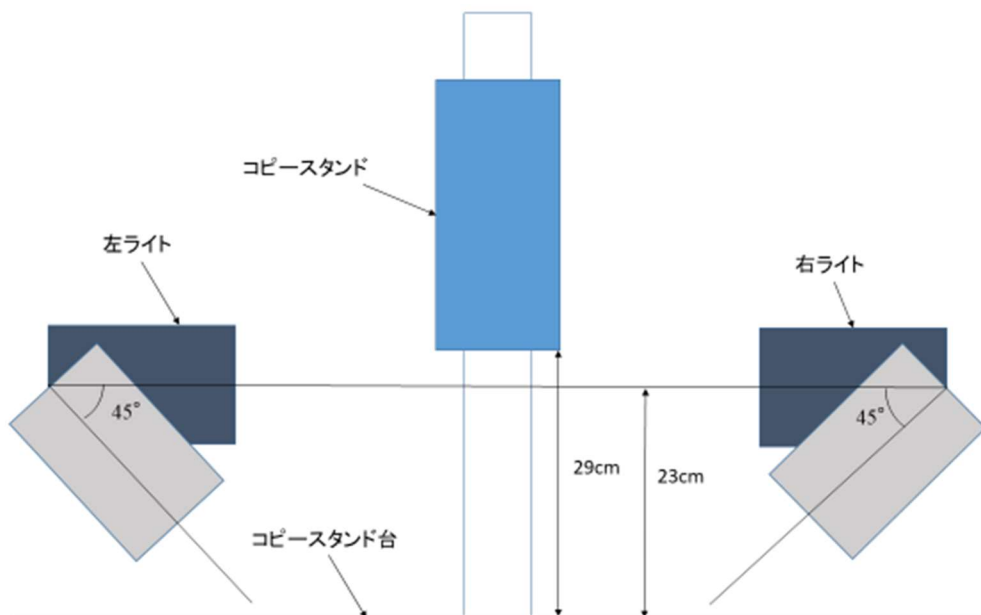


Fig.2.27 デジタルカメラをコピースタンドに設置したときの概観



(a) 上から見た様子

Fig.2.28 撮影時の照明の位置関係



(b) 正面から見た様子

Fig.2.28 撮影時の照明の位置関係

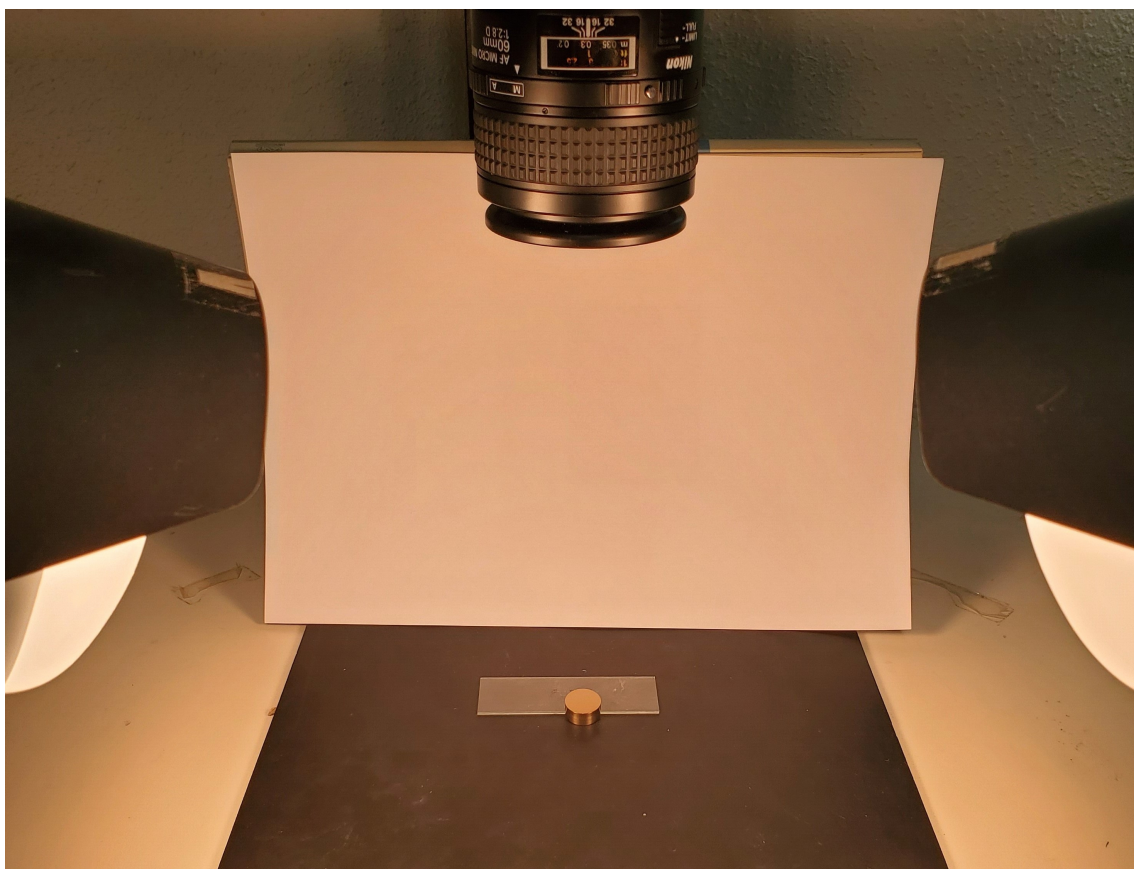


Fig.2.29 撮影の様子

2.7 有限要素法 (FEM) 解析

2.7.1 解析モデルと条件

圧縮試験における工具と試験片の相対すべり量や測定箇所の面圧等を知るために剛塑性有限要素法 (FEM) によるシミュレーションを行った。解析には Virtual Forging (コマツ産機製, バージョン 1.07.03) を使用し, 変形抵抗は材料試験で得られた結果を用いた。解析対象は軸対称を仮定した。Fig.2.30 に FEM 解析モデルと境界条件, Table 2.4 に FEM 解析条件を示す。

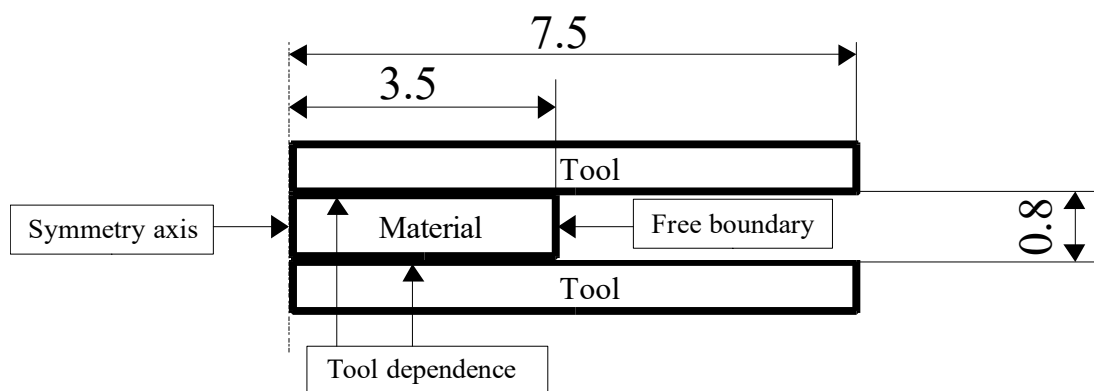


Fig.2.30 FEM 解析モデルと境界条件

Table 2.4 FEM 解析条件

表面マーカ粒子数	208
マーカ粒子数	4626
節点数	3109
要素数	2986
工具節点数	4
要素表面節点数	244

2.7.2 摩擦係数 μ の決定方法

本実験をシミュレートするためには, 工具と試験片間の摩擦係数 μ を決定する必要がある。そこで, Fig.2.31 に示すように未知の μ に初期値を与えて FEM 解析を実行し, 加工荷重を求める。そして, FEM 解析から求めた加工荷重と実験で得られた荷重の比較を行いながら μ を 0.01 刻みで変化させ, 両者の差の絶対値が最小となる μ を求めて実験時の工具と試験片間の摩擦係数であるとした。また Fig.2.32 に, 本研究で使用したアルミニウム試験片と銅試験片の変形抵抗曲線を示す。

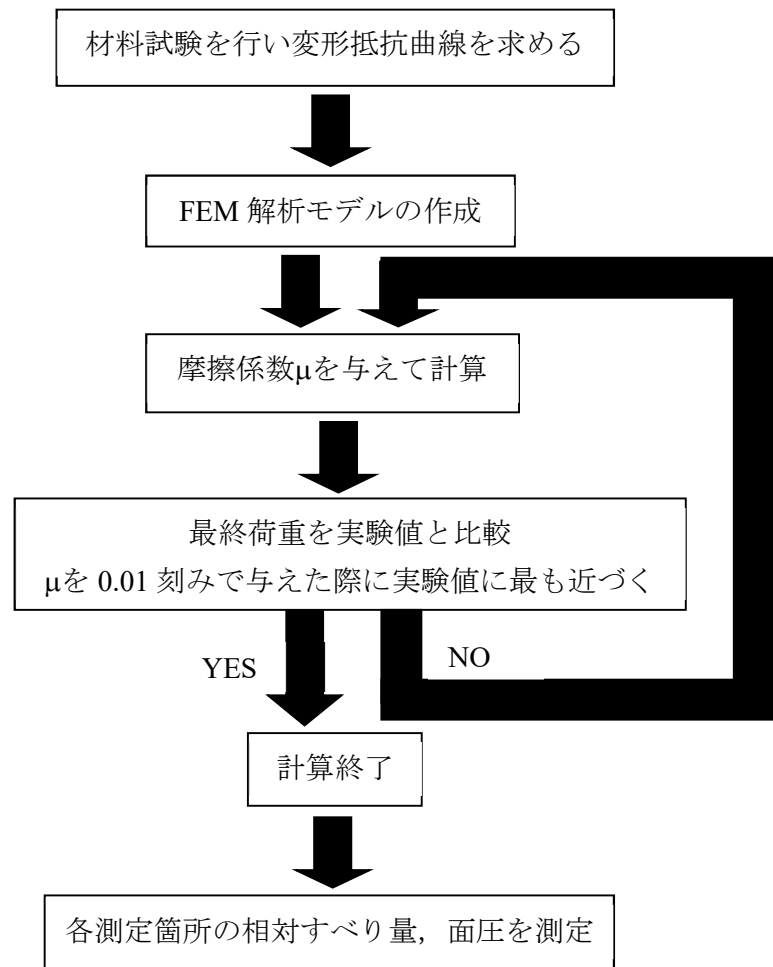
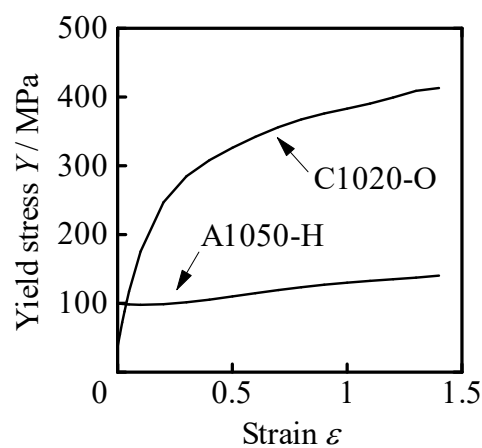
Fig.2.31 摩擦係数 μ の決定方法

Fig.2.32 アルミニウム試験片と銅試験片の変形抵抗曲線

2.7.3 相対すべり量 L_S と工具接触面圧 p の計算

材料流動が平滑化に及ぼす影響を調べるため、Fig.2.33 に示すように圧縮前の試験片表面上のある点が圧縮することにより移動した移動距離を工具と材料の相対すべり量 L_S と定義し、FEM より計算した。また、FEM より工具接触面の面圧を計算し、工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係も調べた。

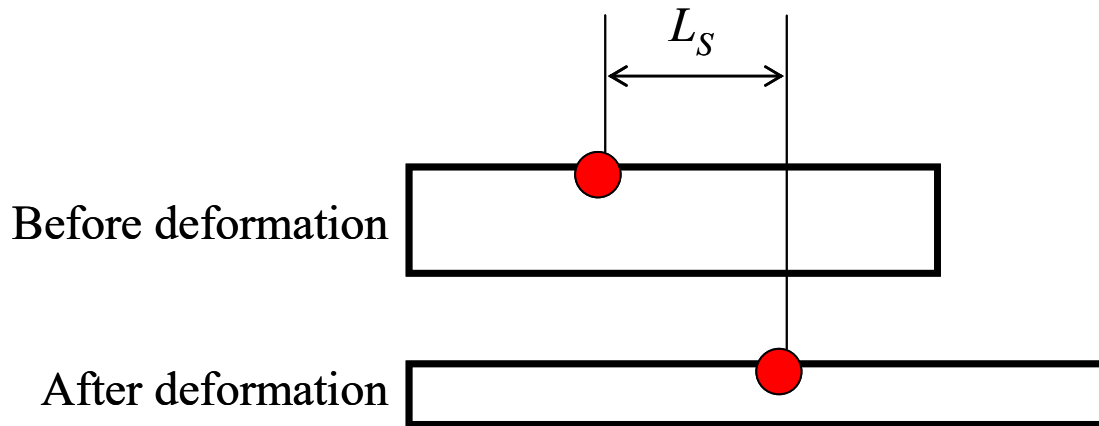


Fig.2.33 相対すべり量 L_S の定義

第3章 圧縮加工による平滑化挙動

圧縮加工による平滑化挙動を調べるため、これまでに、Table 3.1 に示す材料、工具表面膜種、工具表面粗さについて研究を行ってきた。

本研究では、加工硬化、工具表面粗さ、材料、工具表面膜種の違いによる影響を調べるため、Table 3.2 に示すように、まず、アルミニウム引抜き材 (A1050-H) について膜厚 100nm の TiN コーティングを施した工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) を用いた圧縮試験を行った。次に、銅焼きなまし材 (C1020-O) について膜厚 100nm の TiN コーティングを施した工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) と工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) を用いた圧縮試験を行った。さらに触針式表面粗さ計、原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察、有限要素法 (FEM) 解析による変形シミュレーションを行い、加工硬化の影響、工具表面粗さの影響、材料、工具表面膜種の影響について検討した。

Table 3.1 これまでに行った圧縮試験条件

Material of specimen	Coating material of tool	Roughness of tool R_a / nm	Coating thickness of tool / nm
A1050-O	Carbon	10 (Tool-1)	20
			40
		5 (Tool-2)	0
			10
			20
			40
	DLC	10 (Tool-1)	100
		5 (Tool-2)	
	TiN	10 (Tool-1)	100
		5 (Tool-2)	
A1050-H	Carbon	10 (Tool-1)	20
			40
			100
		5 (Tool-2)	20
			40
			100
	DLC	10 (Tool-1)	100
		5 (Tool-2)	
	TiN	5 (Tool-2)	100
	C1020-O	DLC	10 (Tool-1)
5 (Tool-2)			
C1020-H	DLC	10 (Tool-1)	100
		5 (Tool-2)	
	TiN	10 (Tool-1)	100
		5 (Tool-2)	

Table 3.2 本研究で行った圧縮試験条件

Material of specimen	Coating material of tool	Roughness of tool R_a / nm	Coating thickness of tool / nm
A1050-H	TiN	10 (Tool-1)	100
C1020-O	TiN	10 (Tool-1)	100
C1020-O	TiN	5 (Tool-2)	100

3.1 TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$), A1050-H における実験結果

3.1.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.1 に圧縮前と平滑化が進んでいる圧縮率 $e_c=32\%$ の試験片の外観を示す。圧縮加工により試験片表面が鏡面化された様子がわかる。

Fig.3.2 に圧縮後工具表面写真の例を示す。圧縮率が大きくなるにつれてコーティングの剥離により、外周部で工具表面粗さの悪化が見られた。

Fig.3.3 に触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率 41% で最も平滑化が進み、初期工具表面粗さと同程度の R_a となっている。その他の圧縮率では若干のばらつきが見られるが、初期工具表面粗さまでは平滑化が進まない。

各実験において測定された最終荷重 P_{MAX} と圧縮試験後の試験片の断面積 A_S より、以下の式から平均面圧 p_{mean} を求めて検討を行った。

$$p_{mean} = \frac{P_{MAX}}{A_S} \quad / \text{MPa} \quad (3.1)$$

Fig.3.4 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率が大きくなるにつれ平均面圧も大きくなり、圧縮率 40% 以降で平均面圧が急激に大きくなっていることがわかる。

Fig.3.5 に荷重 P とレコーダー出力変位 S_r の関係を示す。それぞれの実験において大きな違いは見られない。

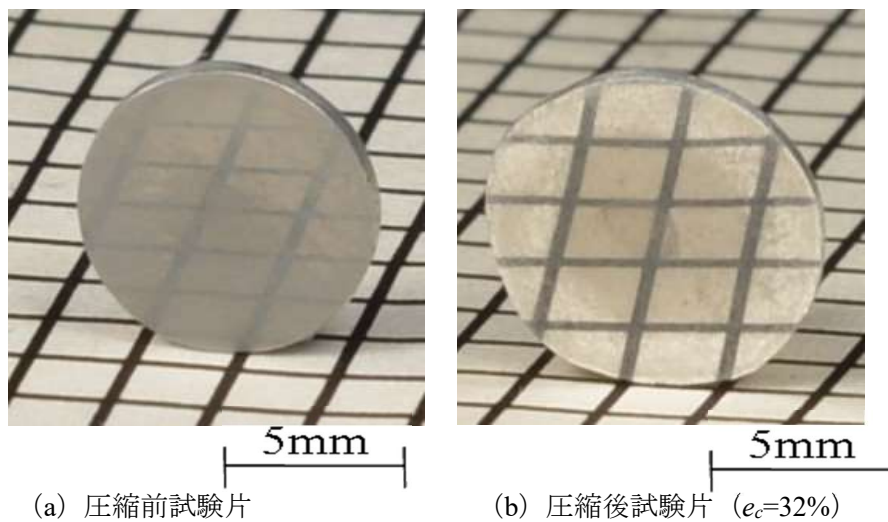


Fig.3.1 圧縮前後の試験片の外観 (TiN, Tool-1, A1050-H)

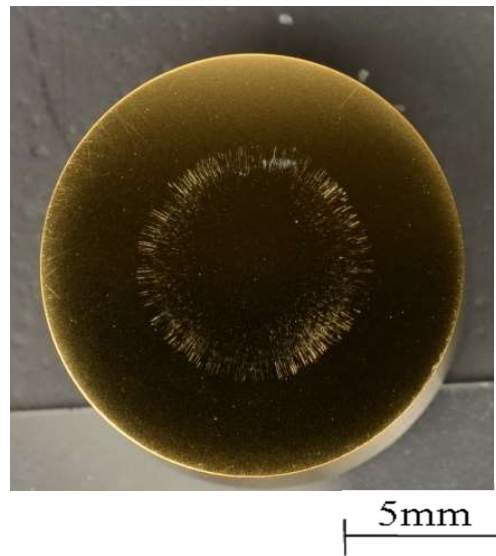


Fig.3.2 圧縮後工具表面 (TiN, Tool-1, A1050-H, $e_c=32\%$)

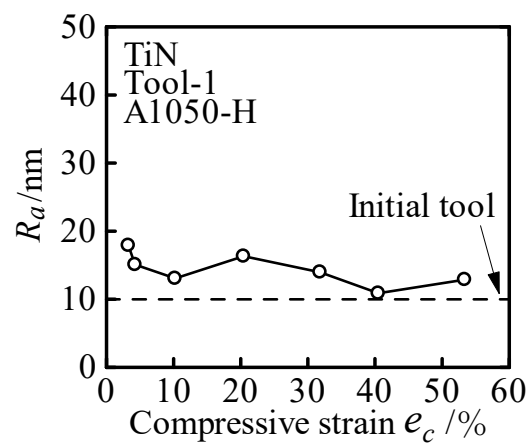


Fig.3.3 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H)

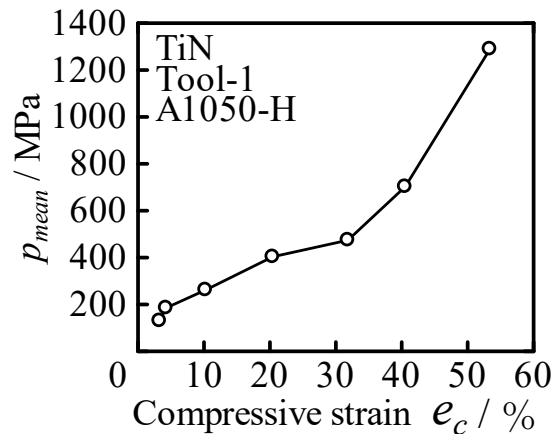


Fig.3.4 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H)

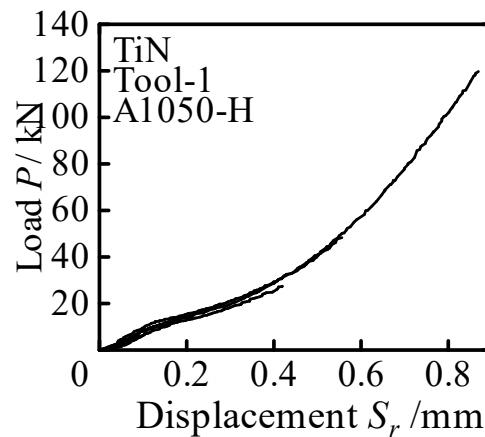


Fig.3.5 荷重 P とレコーダー出力変位 S_r の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H)

3.1.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

AFM を用いて試験片の局所的な観察を行った。Fig.3.6 に試験片初期表面の AFM 像を、Fig.3.7 に $e_c=32\%$ に圧縮した試験片の AFM 像を示す。画像より外周部であっても材料流動の様子は見られない。

Fig.3.8 に AFM により得られた算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率 40% までは圧縮率が大きくなるにつれて S_a が小さくなる。また、中心部よりも外周部でより S_a が小さくなる傾向が見られるが、その差は小さいことがわかる。

Fig.3.9 に圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。 $e_c=3\sim 10\%$ において、3%ではその他と比べ平滑化が進んでいないことがわかる。中心部に比べ外周部ではわずかに平滑化が進む傾向が見られる。 $e_c=20\sim 53\%$ においては、圧縮率が大きいほど平滑化が進む傾向が見られ、中心部に比べ外周部ではわずかに平滑化が進む傾向が見られる。

Fig.3.10 に測定箇所 $r=1\text{mm}$ 、Fig.3.11 に測定箇所 $r=3\text{mm}$ での算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測

定方向の関係を示す. $r=1\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ のいずれにおいてもすべての圧縮率において, r 方向と θ 方向で R_{ae} の値に大きな違いは見られない.

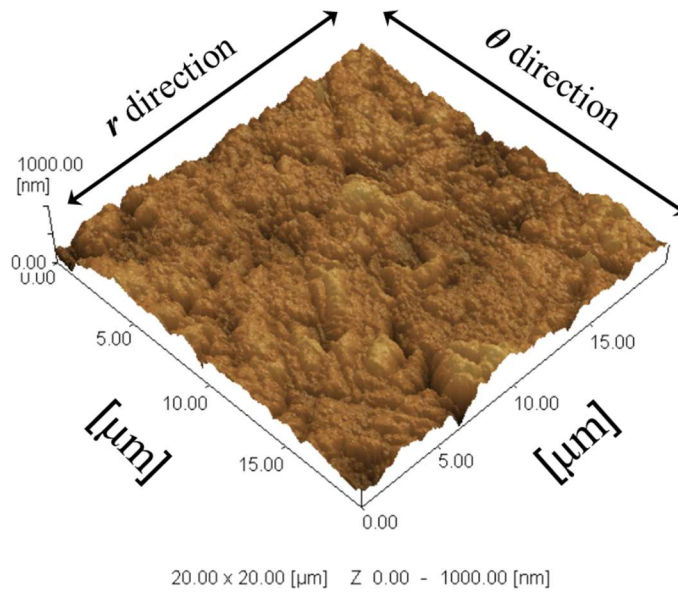
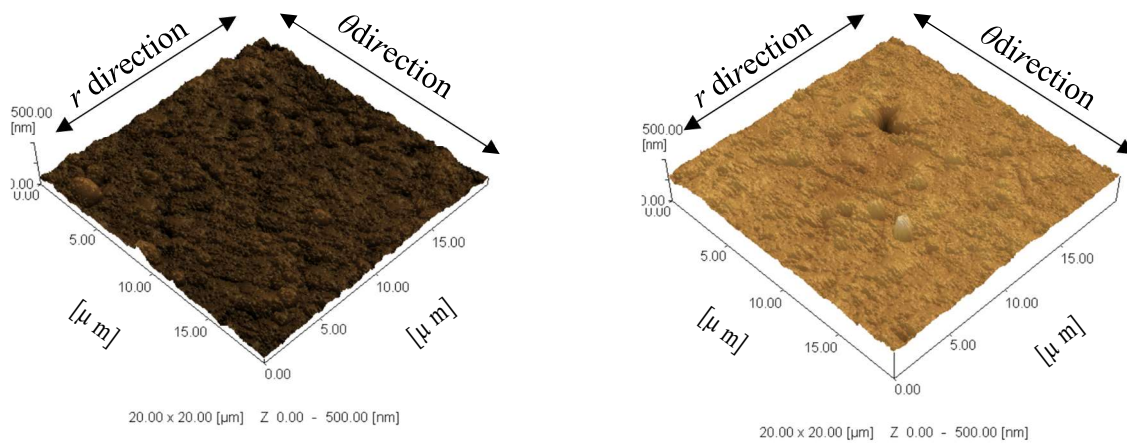


Fig.3.6 初期試験片表面の AFM 像の例 ($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)



(a) 測定箇所 $r=0\text{mm}$

(b) 測定箇所 $r=1\text{mm}$

Fig.3.7 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像
(TiN, Tool-1, A1050-H, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=32\%$)

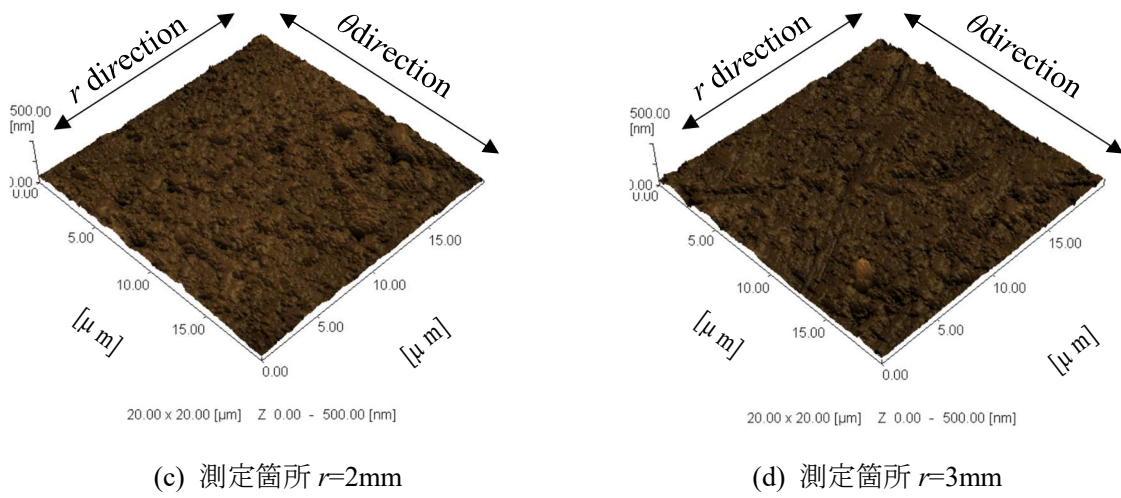


Fig.3.7 圧縮試験後の試験片表面のAFM像
(TiN, Tool-1, A1050-H, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=32\%$)

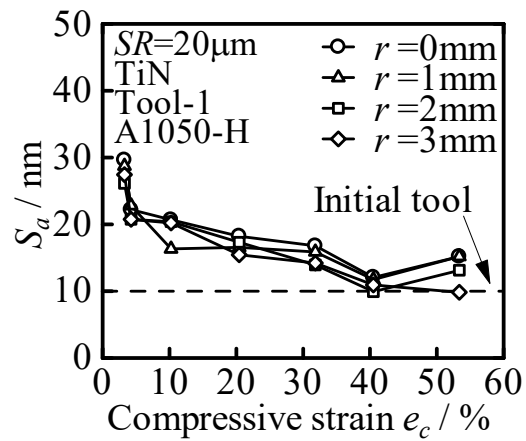


Fig.3.8 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H)

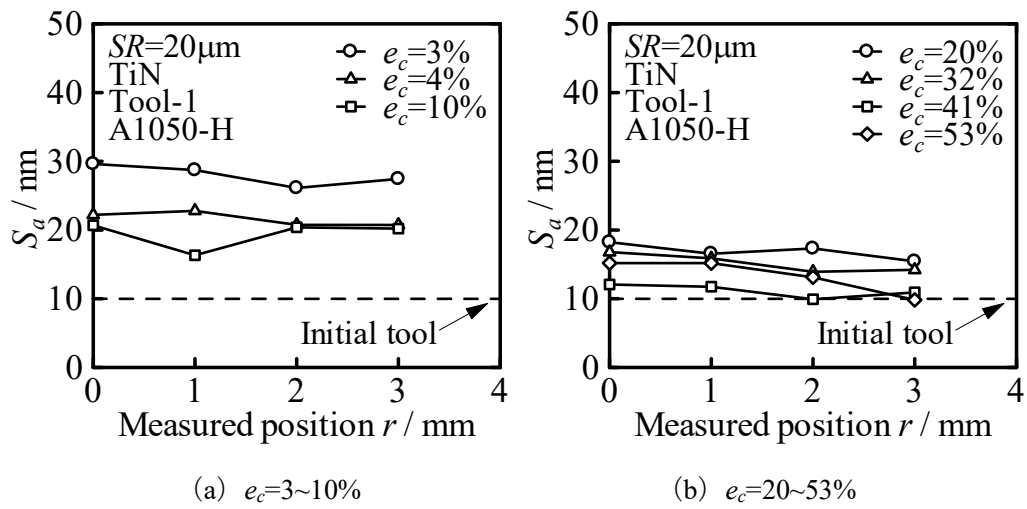


Fig.3.9 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H)

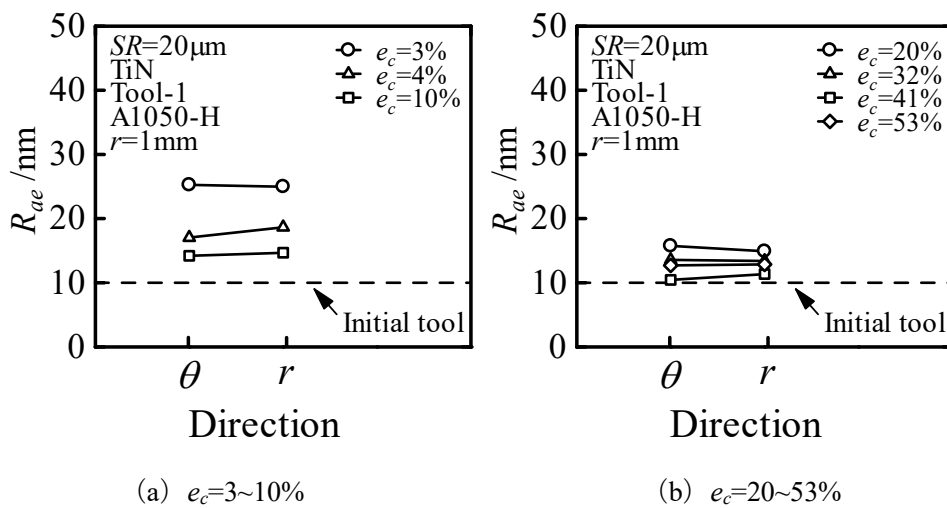


Fig.3.10 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H, $r=1\text{mm}$)

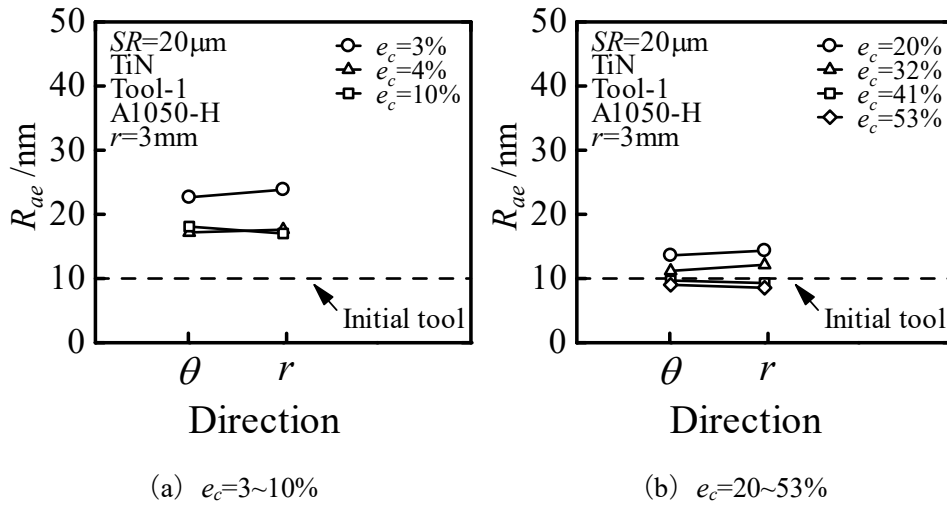


Fig.3.11 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H, $r=3\text{mm}$)

3.1.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

Fig.3.12 に FEM における荷重 P と圧縮率 e_c の関係の例を示す。実験の圧縮率 e_c は変位 S より求め、変位 S は実験中の弾性変形を考慮して以下の式で求めた。

$$S = S_r - DS \times \frac{P}{P_{MAX}} / \text{mm} \quad (3.2)$$

ここで、 S_r ：レコーダ出力の変位、 DS ：総弾性変形量（行程最後のレコーダ出力の変位－（圧縮前の試験片の高さ(実測値)－圧縮後の試験片の高さ(実測値)））、 P_{MAX} ：行程最後の荷重、 P ：行程 S_r での荷重である。圧縮率 $e_c=41\%$ 、 $e_c=53\%$ については FEM において本ソフトで設定可能な最大の摩擦係数 $\mu=0.577$ にして計算した最終荷重よりも、実験値の方が大きくなったため、それ以外の結果のみ考察を行う。加工初期を除き、計算結果と実験結果はおおむね一致している。

Fig.3.13 に FEM 解析による変形の様子を示す。圧縮率が大きくなると、外周部で変形が大きくなることがわかる。また、各実験における最終荷重と一致するように決定した摩擦係数 μ は $0.08 \sim 0.577$ 以上となっている。各実験での潤滑条件は違いがあると考えられる。

Fig.3.14 に FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係を示す。圧縮率が大きくなると面圧、すべり量ともに大きくなることがわかる。

Fig.3.15 に算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係を示す。圧縮率に関わらず、すべり量が大きくなると S_a がわずかに小さくなる傾向があることがわかる。

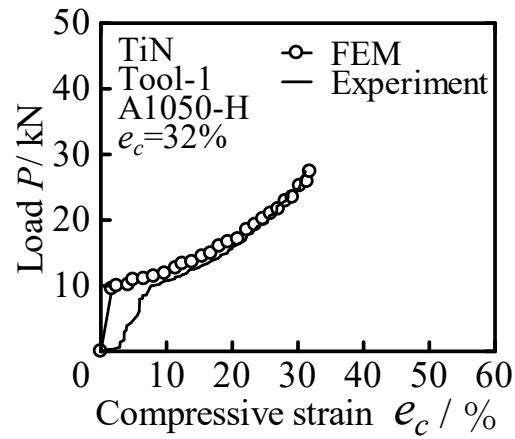


Fig.3.12 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H, $e_c=32\%$)

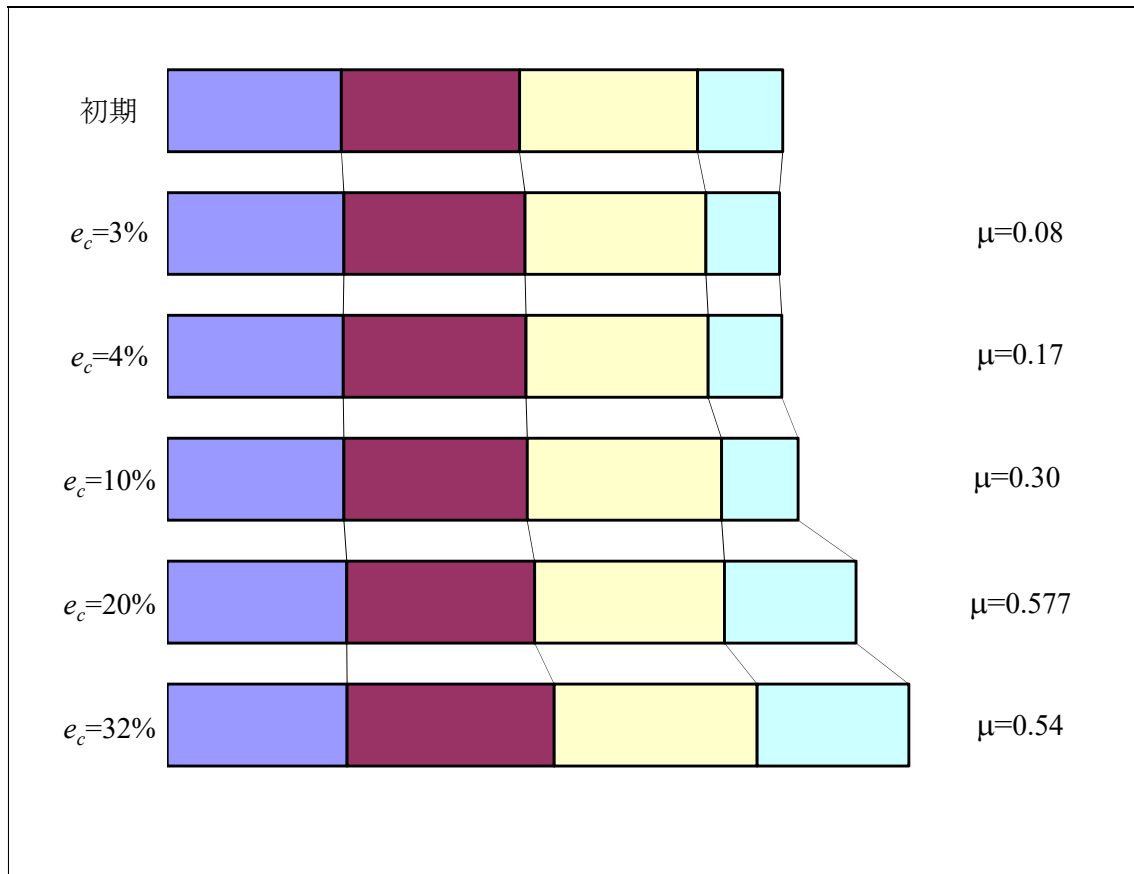


Fig.3.13 FEM 解析による変形の様子

($e_c=3\% : \mu=0.08$, $e_c=4\% : \mu=0.17$, $e_c=10\% : \mu=0.30$, $e_c=20\% : \mu=0.577$, $e_c=32\% : \mu=0.54$)

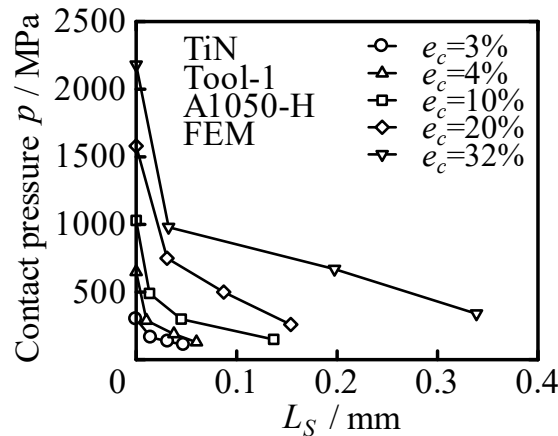


Fig.3.14 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H)

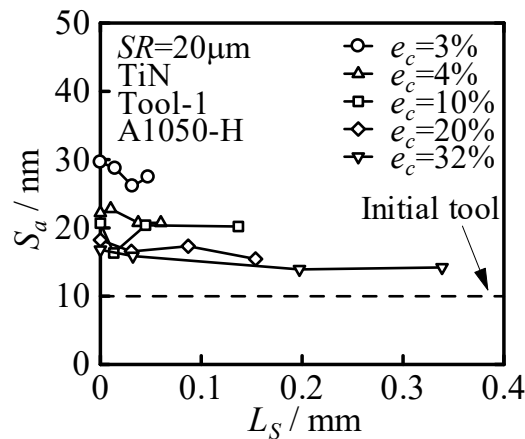


Fig.3.15 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H)

3.2 TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$), C1020-O における実験結果

3.2.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.16 に圧縮前と平滑化が進んでいる圧縮率 $e_c=18\%$ の試験片の外観を示す。圧縮加工により試験片表面が鏡面化された様子がわかる。

Fig.3.17 に圧縮後工具表面写真の例を示す。高圧縮率においてコーティングの剥離により工具表面状態の悪化が見られた。

Fig.3.18 に触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率による平滑度に大きな違いは見られない。

Fig.3.19 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率が大きくなると平均面圧も大きくなる傾向が見られる。

Fig.3.20 に荷重 P と変位 S_r の関係を示す。高圧縮率においてわずかなばらつきが見られる。

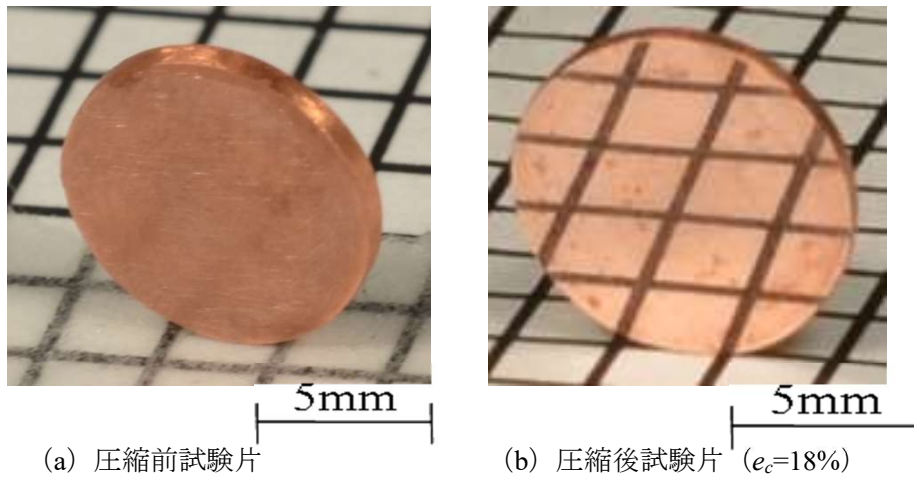


Fig.3.16 圧縮前後の試験片の外観 (TiN, Tool-1, C1020-O)



Fig.3.17 圧縮後工具表面 (TiN, Tool-1, C1020-O, $e_c=18\%$)

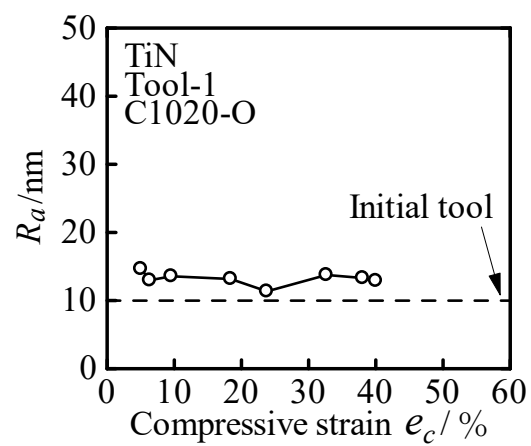


Fig.3.18 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O)

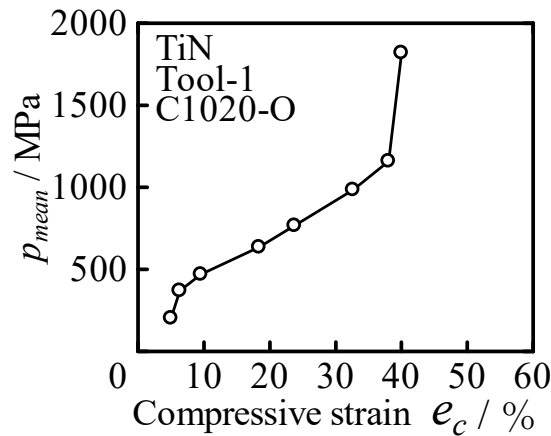


Fig.3.19 平均面圧 P_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O)

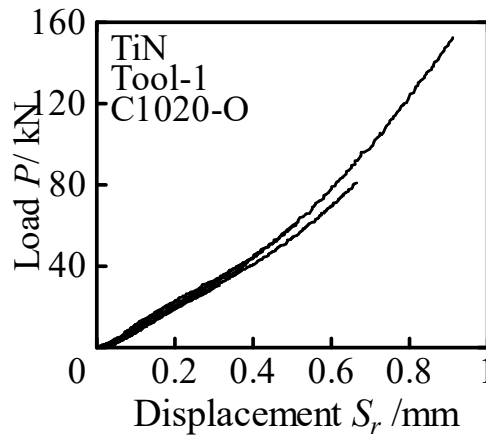


Fig.3.20 荷重 P と変位 S_r の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O)

3.2.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

AFM を用いて試験片の局所的な観察を行った. Fig.3.21 に試験片初期表面の AFM 像を, Fig.3.22 に $e_c=18\%$ に圧縮した試験片の AFM 像を示す. 画像より, 外周部では r 方向に材料流動した様子が見られる.

Fig.3.23 に AFM により得られた算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 圧縮率による S_a の変化は小さく, いずれの圧縮率においても中心部よりも外周部でより平滑化が進むことがわかる.

Fig.3.24 に圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. 低圧縮率では 0mm, 1mm, 2mm では大きな差は見られず, 3mm でより平滑化が進む傾向が見られる. 高圧縮率では 0mm, 1mm では大きな差は見られず, 2mm, 3mm でより平滑化が進むことがわかる.

Fig.3.25 に測定箇所 $r=1\text{mm}$, Fig.3.26 に測定箇所 $r=3\text{mm}$ での算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係を示す. $r=1\text{mm}$ ではいずれの圧縮率においても測定方向による大きな違いは

見られないが、 $r=3\text{mm}$ では高圧縮率において θ 方向よりも r 方向の方が R_{ae} が小さくなる傾向がある。これは、 r 方向では材料流動によるしごき効果により θ 方向に比べて平滑化が進んでいるためであると考えられる。

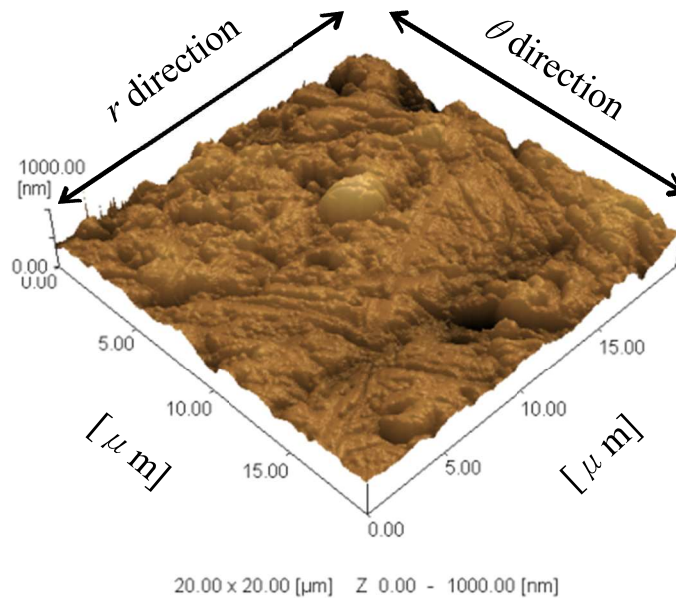
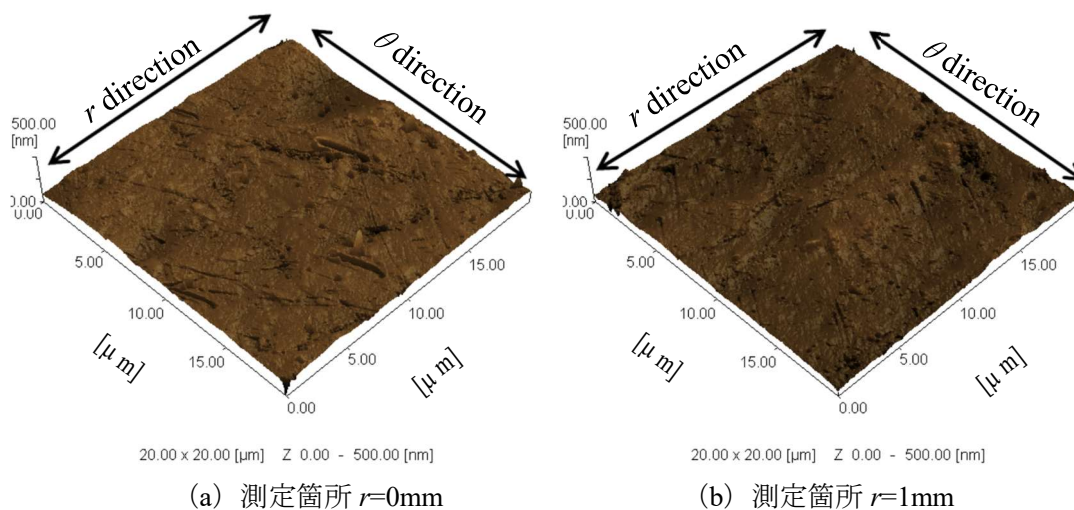


Fig.3.21 初期試験片表面の AFM 像の例 ($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)



(a) 測定箇所 $r=0\text{mm}$

(b) 測定箇所 $r=1\text{mm}$

Fig.3.22 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像
(TiN, Tool-1, C1020-O, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=18\%$)

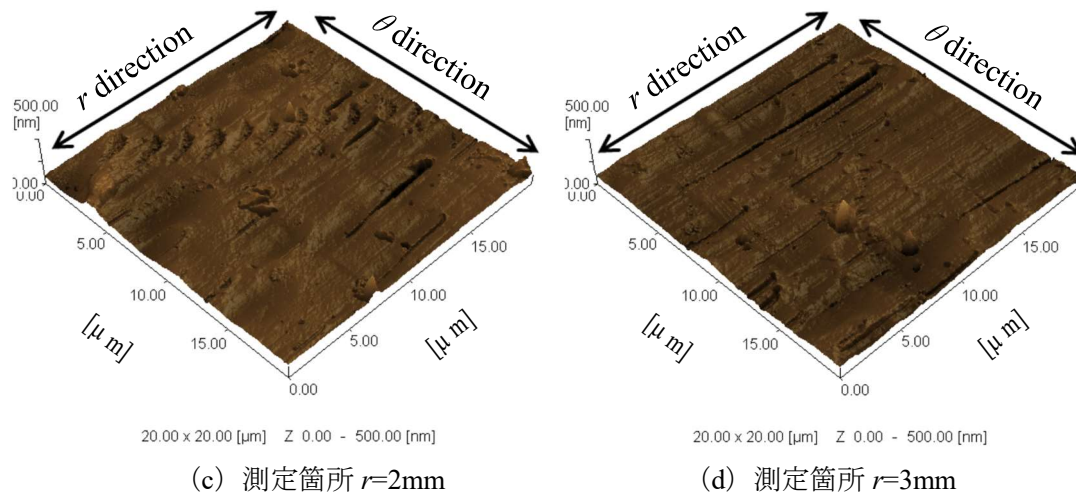


Fig.3.22 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像
(TiN, Tool-1, C1020-O, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=18\%$)

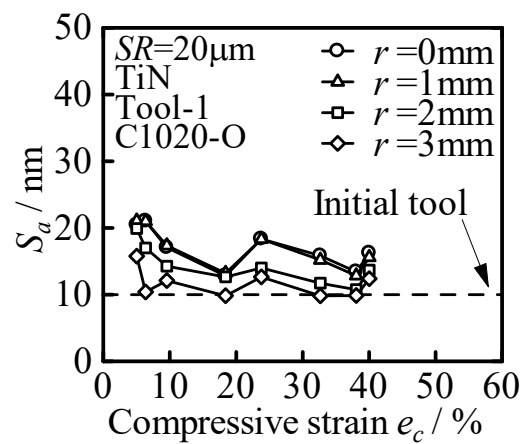


Fig.3.23 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O)

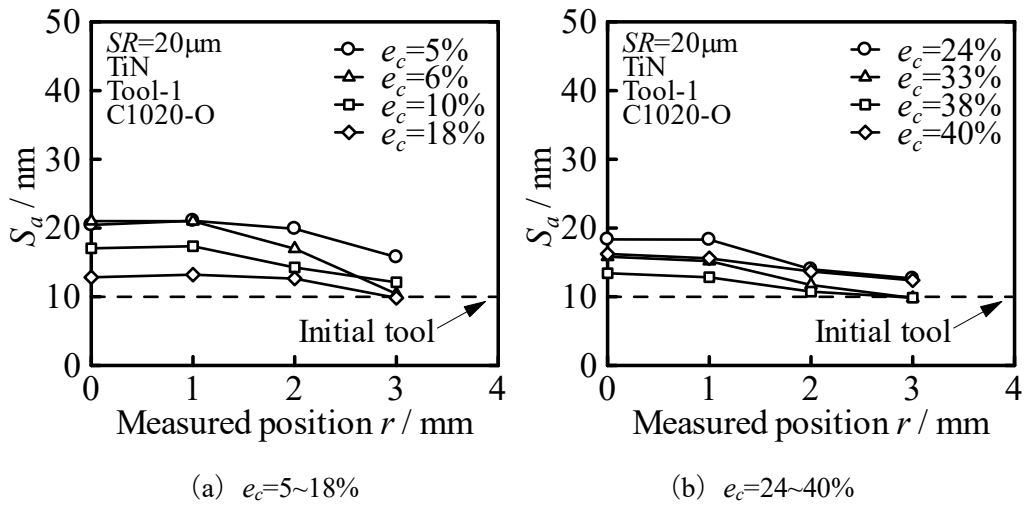


Fig.3.24 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O)

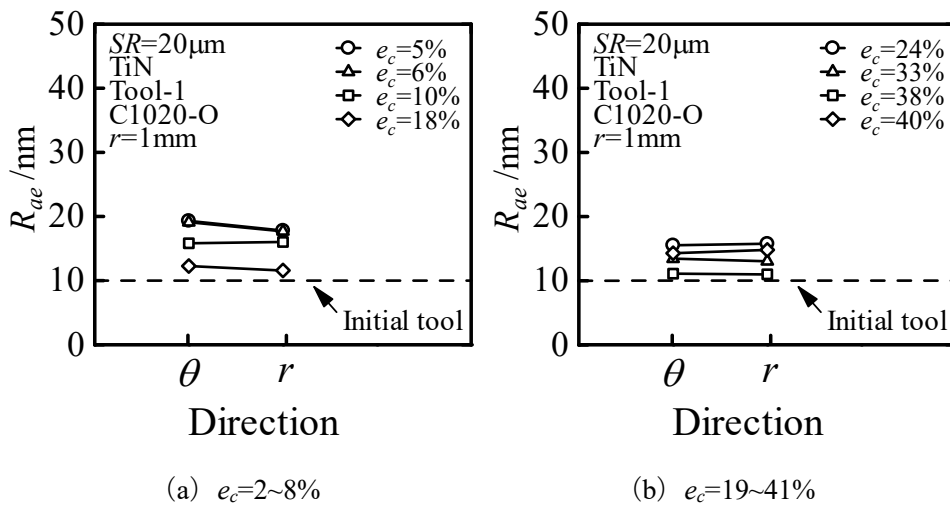


Fig.3.25 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O, $r=1\text{mm}$)

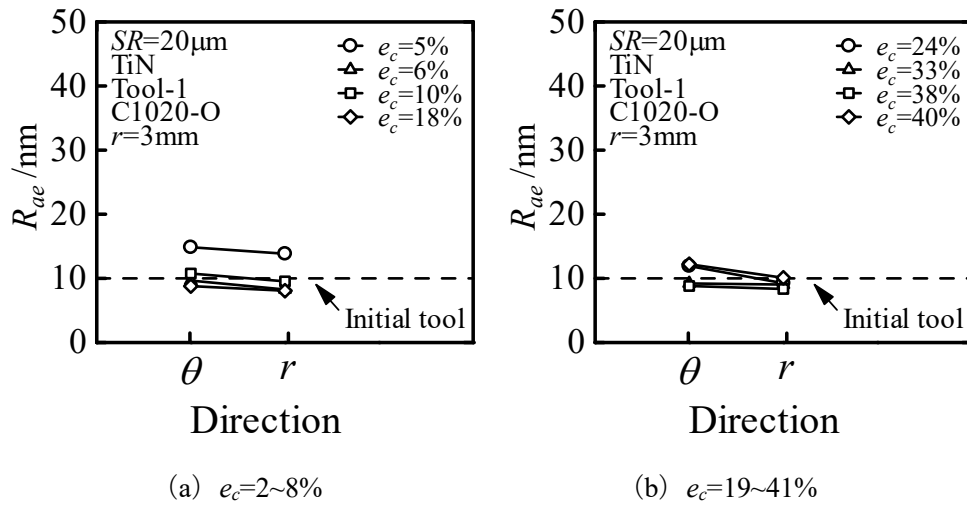


Fig.3.26 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 (DLC, Tool-1, C1020-O, $r=3\text{mm}$)

3.2.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

3.1.3 と同様に FEM 解析を行った。Fig.3.27 に FEM における荷重 P と圧縮率 e_c の関係の例を示す。圧縮率 $e_c=10\%$ 程度までは FEM の荷重が大きい結果となっているが、それ以降では FEM と実験結果は一致していることがわかる。なお、圧縮率 $e_c=40\%$ については FEM において本ソフトウェアで設定できる最大摩擦係数 $\mu=0.577$ にして計算した最終荷重よりも、実験値が大きくなったため、それ以外の結果のみ考察を行う。最終荷重が一致したものについては、加工初期を除き実験結果と FEM 結果はおおむね一致している。

Fig.3.28 に FEM 解析による変形の様子を示す。圧縮率が大きくなると、外周部での変形が大きくなることがわかる。また、各実験における最終荷重と一致するように決定した摩擦係数 μ は $0.15\sim 0.577$ 以上となっている。各実験での潤滑条件は違いがあると考えられる。

Fig.3.29 に FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。圧縮率が大きくなると面圧、すべり量ともに大きくなることがわかる。

Fig.3.30 に算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。いずれの圧縮率においてもすべり量が大きくなると S_a が小さくなることがわかる。

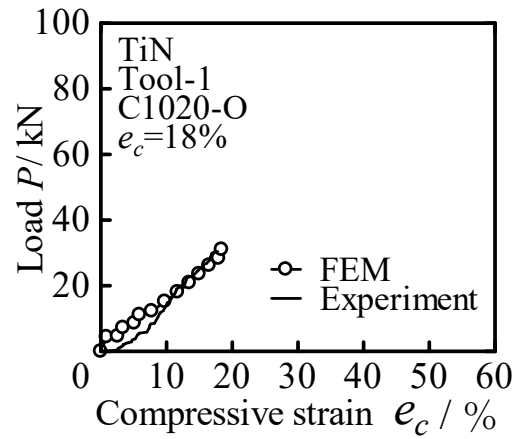


Fig.3.27 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O, $e_c=18\%$)

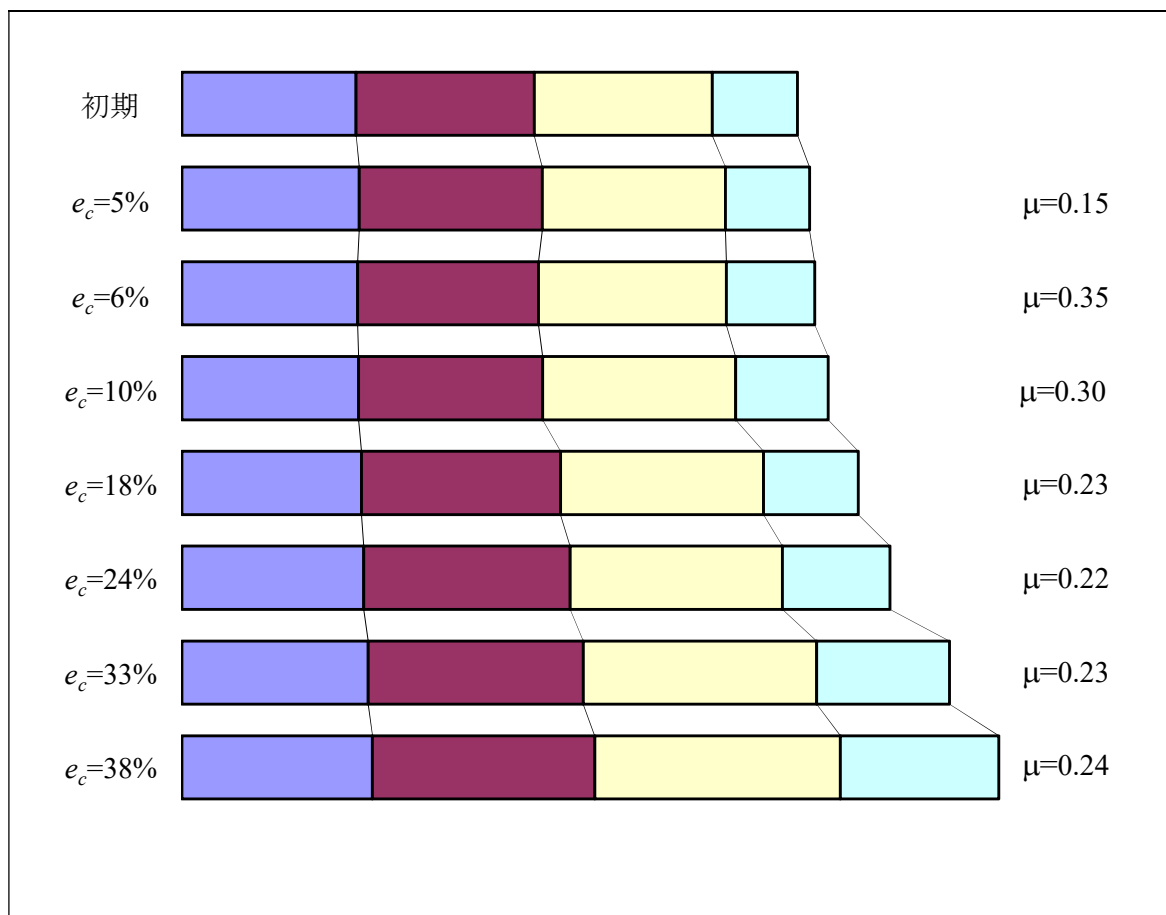


Fig.3.28 FEM 解析による変形の様子

($e_c=5\% : \mu=0.15$, $e_c=6\% : \mu=0.35$, $e_c=10\% : \mu=0.30$, $e_c=18\% : \mu=0.23$,
 $e_c=24\% : \mu=0.22$, $e_c=33\% : \mu=0.23$, $e_c=38\% : \mu=0.24$)

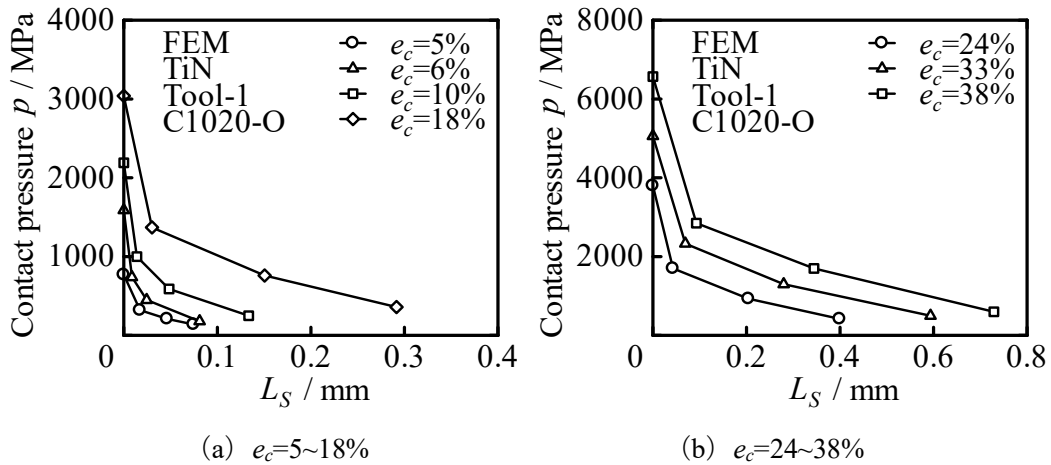


Fig.3.29 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O)

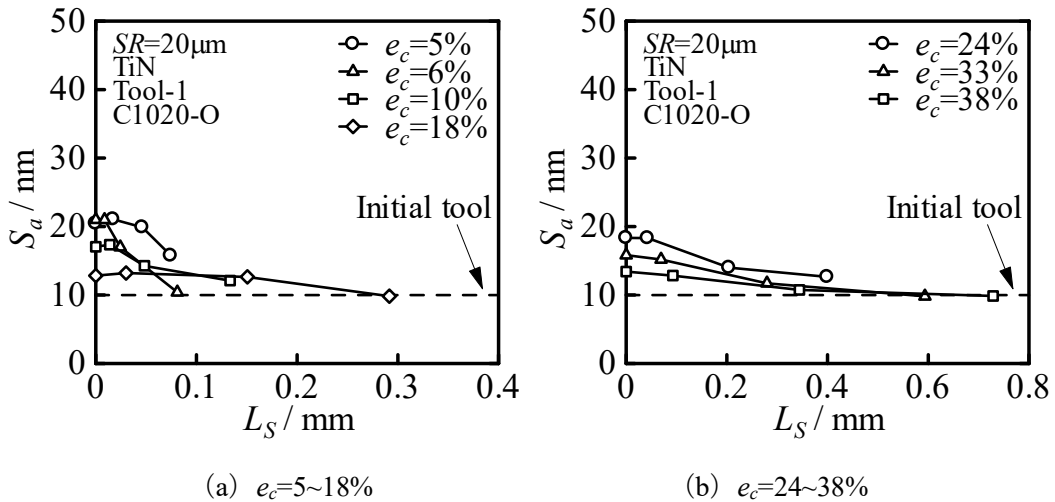


Fig.3.30 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O)

3.3 TiN コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$), C1020-O における実験結果

3.3.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.31 に圧縮前と平滑化が進んでいる圧縮率 $e_c=16\%$ の試験片の外観を示す。圧縮加工により試験片表面が鏡面化された様子がわかる。

Fig.3.32 に圧縮後工具表面写真の例を示す。高圧縮率においてコーティングの剥離により工具表面状態の悪化が見られた。

Fig.3.33 に触針式表面粗さ計より得られた算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率による平滑度に大きな違いは見られない。

Fig.3.34 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率が大きくなると平均面圧も大きくなる傾向が見られる。

Fig.3.35 に荷重 P とレコーダー出力変位 S_r の関係を示す。それぞれの実験において大きな

違いは見られない。

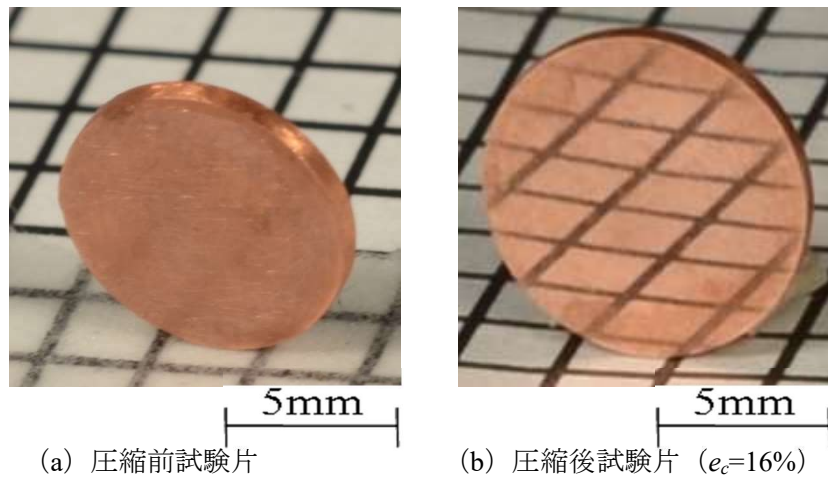


Fig.3.31 圧縮前後の試験片の外観 (TiN, Tool-2, C1020-O)

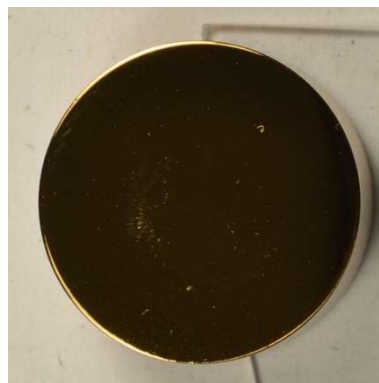


Fig.3.32 圧縮後工具表面 (TiN, Tool-2, C1020-O, $e_c=16\%$)

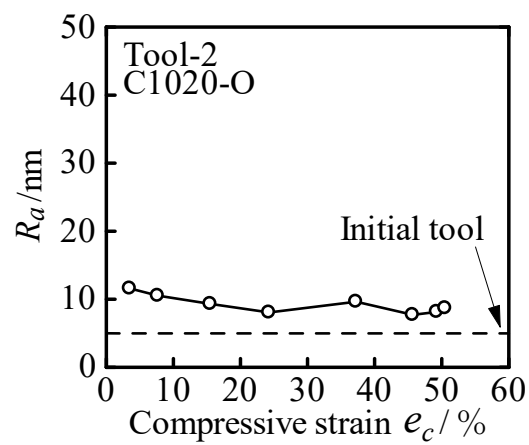


Fig.3.33 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O)

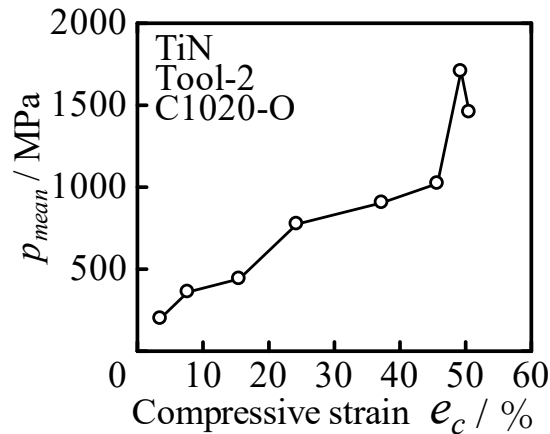


Fig.3.34 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O)

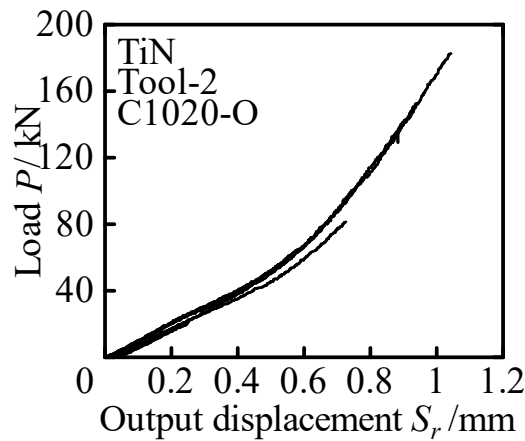


Fig.3.35 荷重 P とレコーダー出力変位 S_r の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O)

3.3.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

AFM を用いて試験片の局所的な観察を行った. Fig.3.36 に試験片初期表面の AFM 像を, Fig.3.37 に $e_c=16\%$ に圧縮した試験片の AFM 像を示す. 画像より, 外周部ではわずかに r 方向に材料流動した様子が見られる.

Fig.3.38 に AFM により得られた算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 圧縮率が大きくなるにつれて S_a が小さくなり, 圧縮率 20% 以上では大きな差は見られない. いずれの圧縮率においても中心部よりも外周部でより S_a が小さくなる傾向が見られ, 低圧縮率ではその差が大きくなる.

Fig.3.39 に圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. 低圧縮率では外周部の方がより S_a が小さくなる傾向が見られるが, 高圧縮率では大きな差は見られない.

Fig.3.40 に測定箇所 $r=1\text{mm}$, Fig.3.41 に測定箇所 $r=3\text{mm}$ での算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係を示す. $r=1\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ とともに測定方向による違いは見られない.

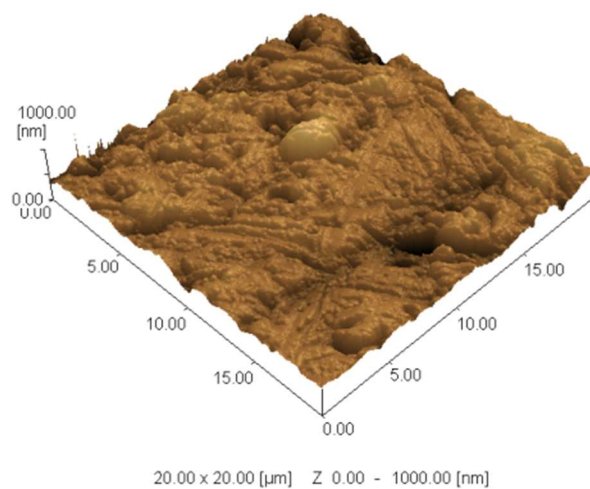


Fig.3.36 初期試験片表面の AFM 像の例 ($SR=20\mu\text{m}$, $e_c=0\%$)

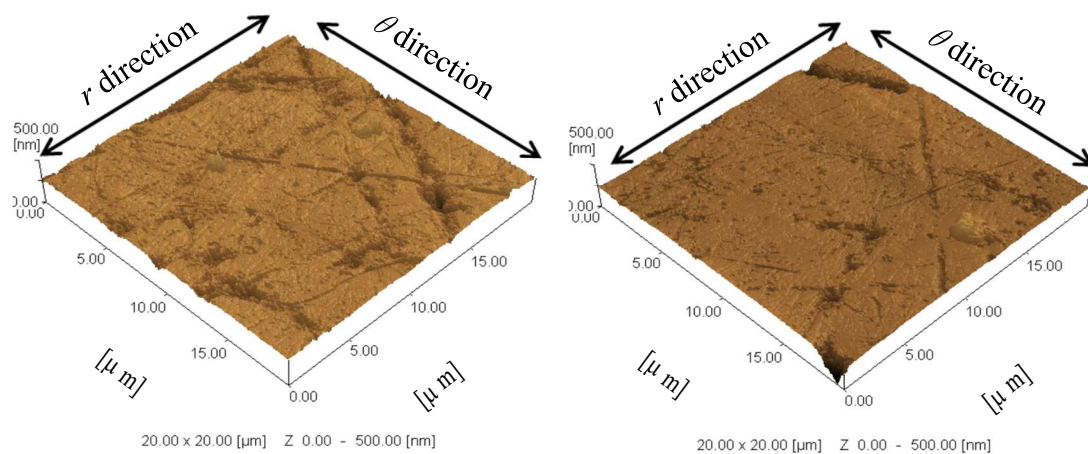


Fig.3.37 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像
(TiN, Tool-2, C1020-O, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=16\%$)

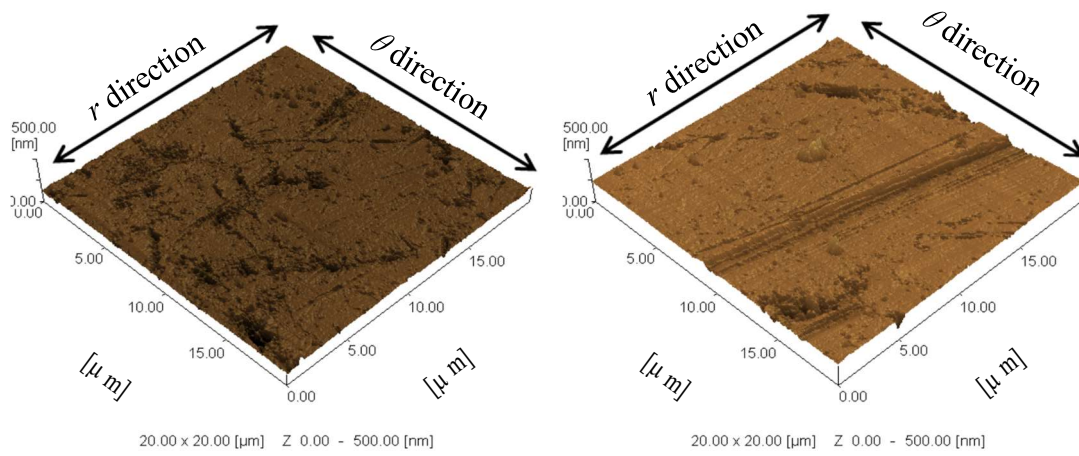
(c) 測定箇所 $r=2\text{mm}$ (d) 測定箇所 $r=3\text{mm}$

Fig.3.37 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像
(TiN, Tool-2, C1020-O, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=16\%$)

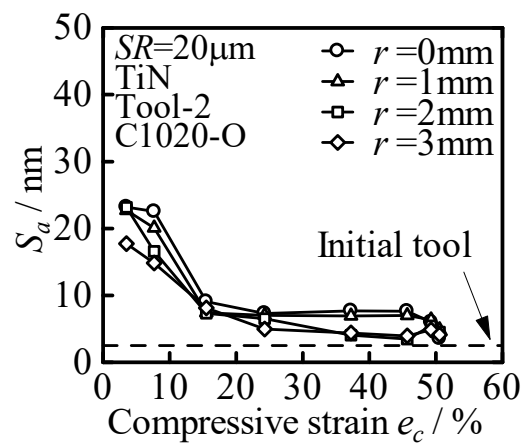
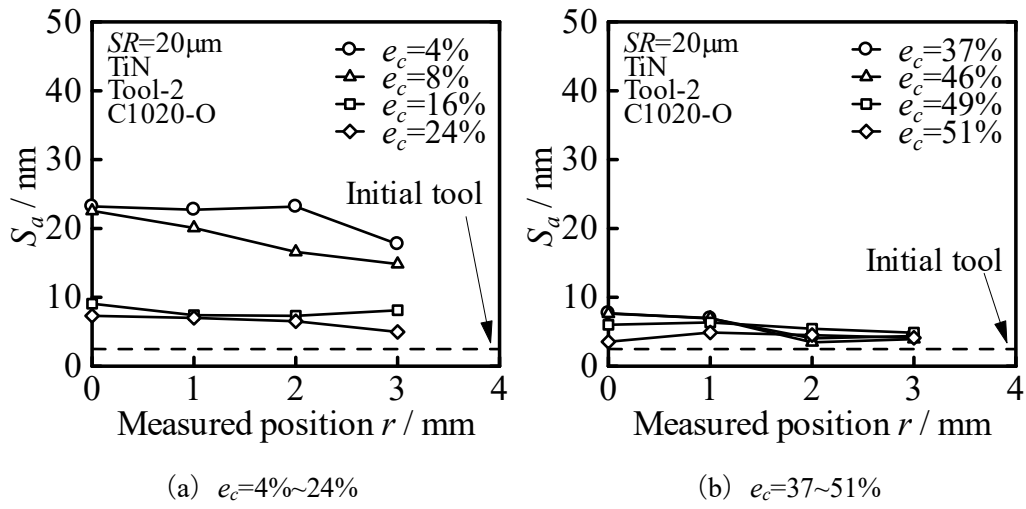
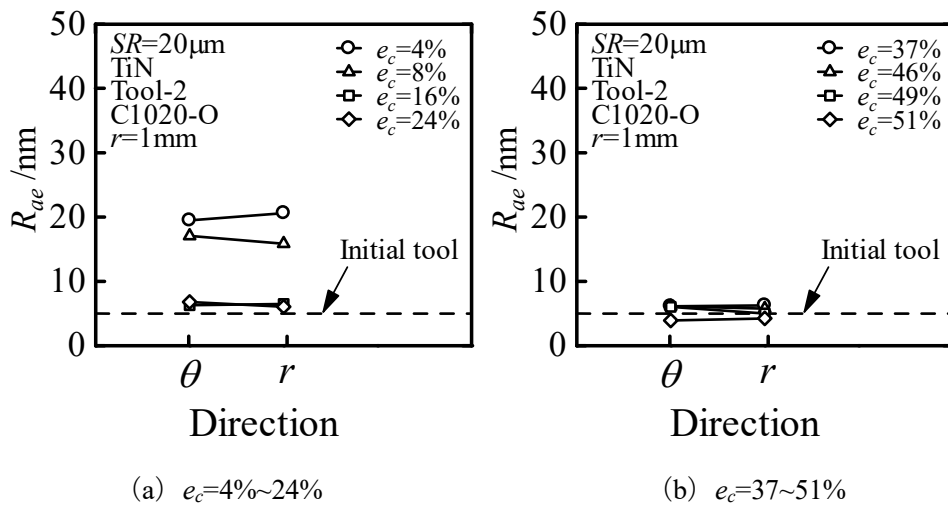


Fig.3.38 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O)

Fig.3.39 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O)Fig.3.40 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O, $r=1\text{mm}$)

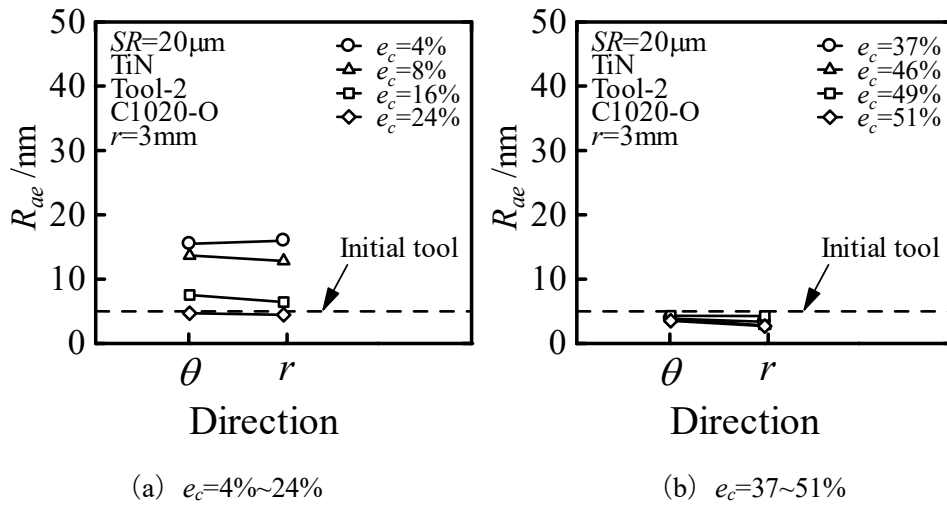


Fig.3.41 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O, $r=3\text{mm}$)

3.3.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

3.1.3 と同様に FEM 解析を行った。Fig.3.42 に FEM における荷重 P と圧縮率 e_c の関係の例を示す。なお、圧縮率 $e_c=51\%$ については FEM において本ソフトウェアで設定できる最大摩擦係数 $\mu=0.577$ にして計算した最終荷重よりも、実験値が大きくなったため、それ以外の結果のみ考察を行う。 $e_c=49\%$ を除き最終荷重が一致したのものについては、加工初期を除き実験結果と FEM 結果はおおむね一致している。

Fig.3.43 に FEM 解析による変形の様子を示す。FEM 解析による変形の様子を示す。圧縮率が大きくなると、外周部での変形が大きくなることがわかる。また、各実験における最終荷重と一致するように決定した摩擦係数 μ は $0.14 \sim 0.577$ 以上となっている。各実験での潤滑条件は違いがあると考えられる。

Fig.3.44 に FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係を示す。圧縮率が大きくなると面圧、すべり量ともに大きくなることがわかる。

Fig.3.45 に算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係を示す。低圧縮率ではすべり量が大きくなると S_a が小さくなる傾向がみられる。高圧縮率ではすべり量による大きな違いは見られない。

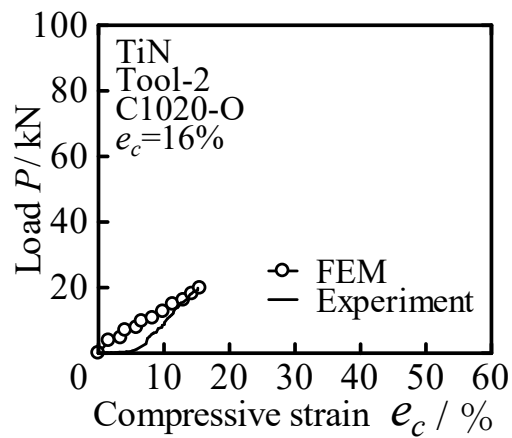


Fig.3.42 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O, $e_c=16\%$)

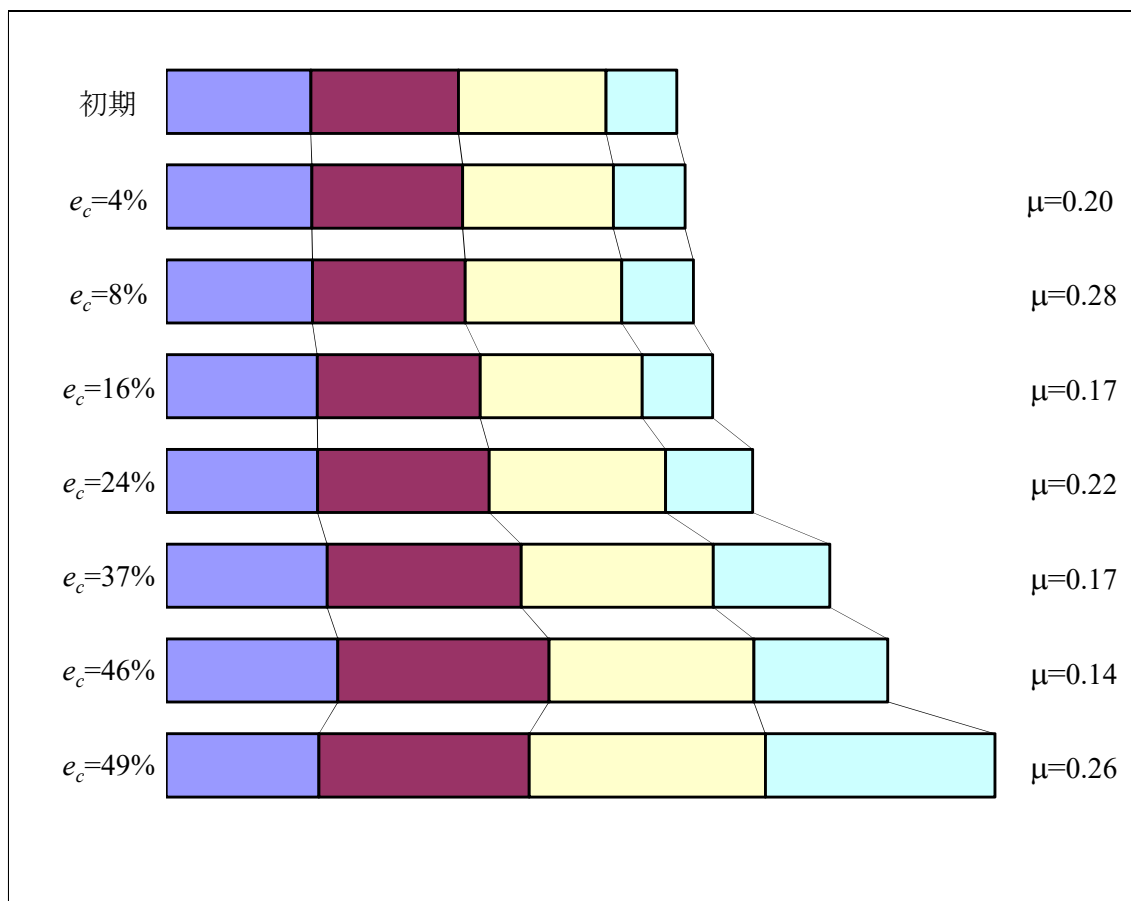


Fig.3.43 FEM 解析による変形の様子

($e_c=4\% : \mu=0.20$, $e_c=8\% : \mu=0.28$, $e_c=16\% : \mu=0.17$, $e_c=24\% : \mu=0.22$,
 $e_c=37\% : \mu=0.17$, $e_c=46\% : \mu=0.14$, $e_c=49\% : \mu=0.26$)

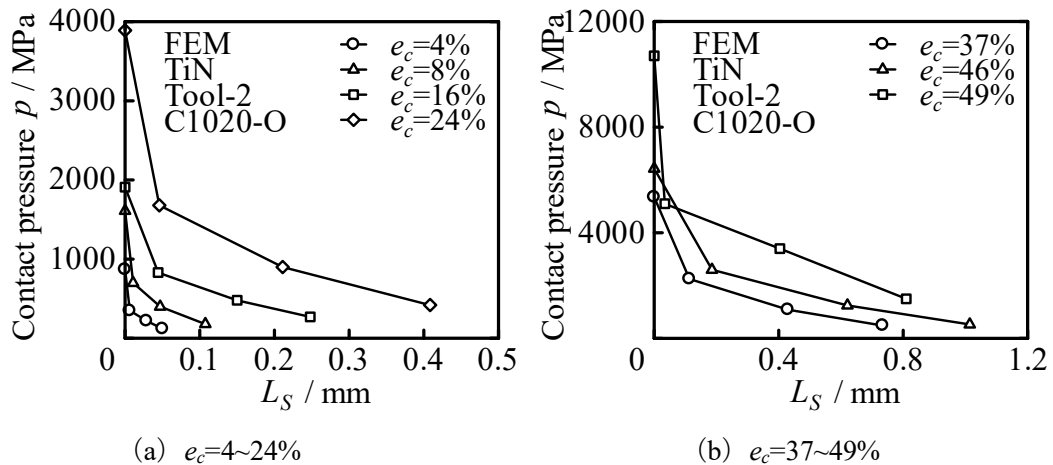


Fig.3.44 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O)

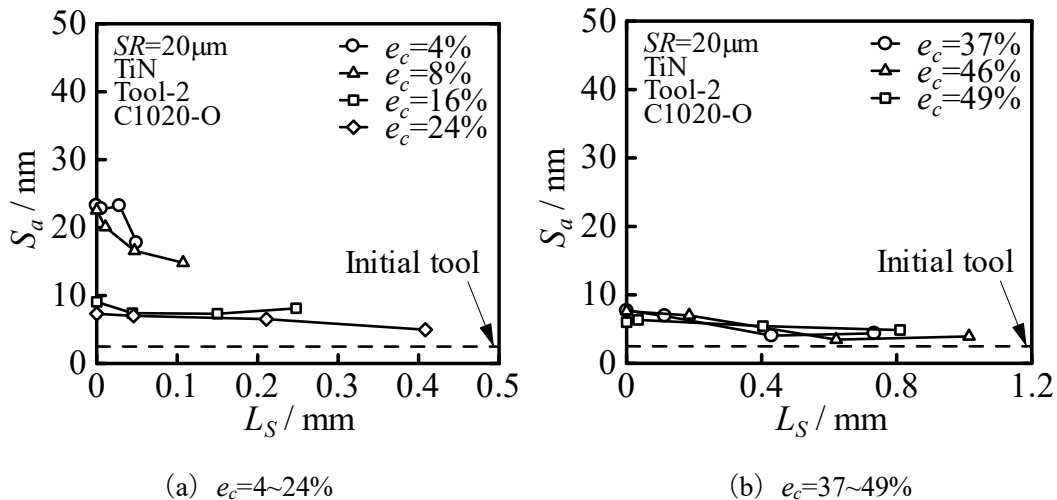


Fig.3.45 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O)

3.4 加工硬化の影響

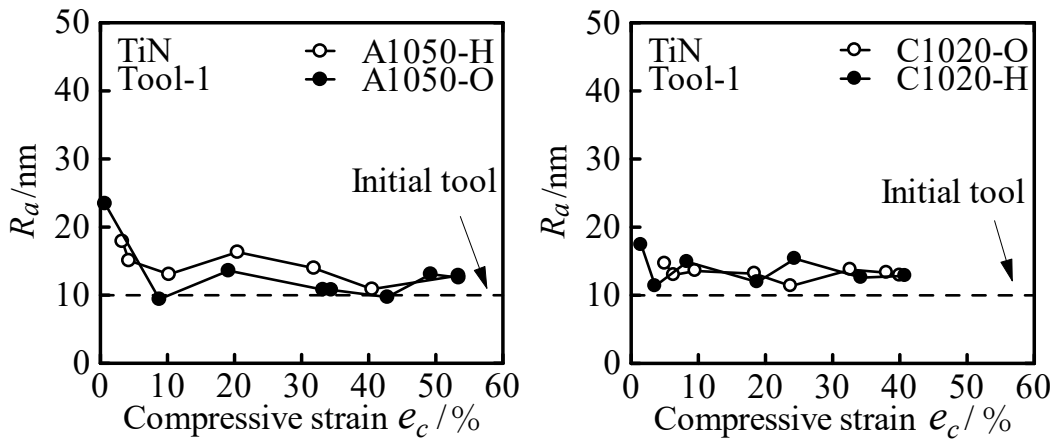
加工硬化の影響を調べるため、TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った A1050-H の圧縮試験結果と過去に行った A1050-O の圧縮試験結果⁽²⁵⁾の比較、TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った C1020-O の圧縮試験結果と過去に行った C1020-H の圧縮試験結果⁽²⁴⁾の比較、TiN コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った C1020-O の圧縮試験結果と過去に行った C1020-H の圧縮試験結果⁽²⁴⁾の比較を行う。

3.4.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.46 に各条件における触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの条件においても圧縮率にかかわらず、O 材と H 材で大きな差は見られない。

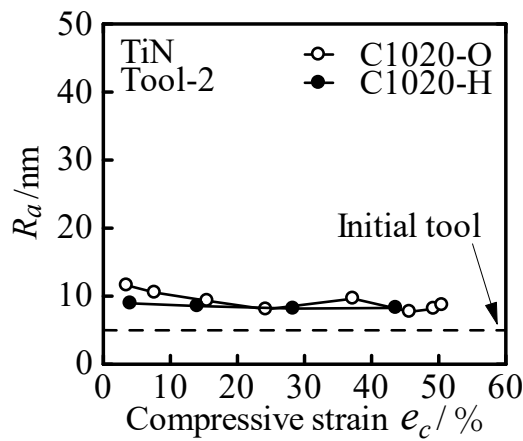
Fig.3.47 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。TiN, Tool-1, アルミニウムの条件と TiN, Tool-1, 銅の条件では圧縮率 30%程度までは H 材の方が平均面圧が大きくなり、それ以降は大きな差は見られない。TiN, Tool-2, 銅の条件ではいずれの圧縮率においても H 材の方が平均面圧が大きくなる。

Fig.3.48 に荷重 P と変位 S_r の関係を示す。いずれの条件においても H 材の方が荷重は大きくなることわかる。



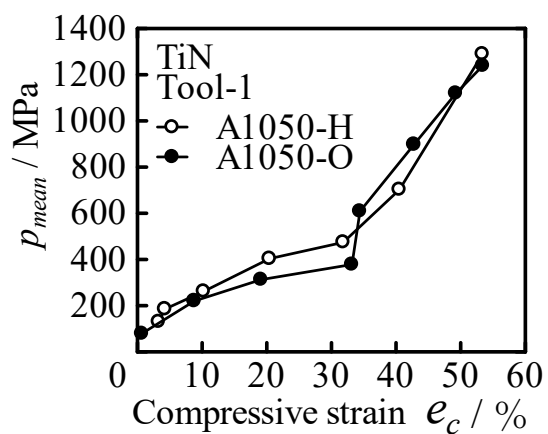
(a) TiN, Tool-1, アルミニウム

(b) TiN, Tool-1, 銅

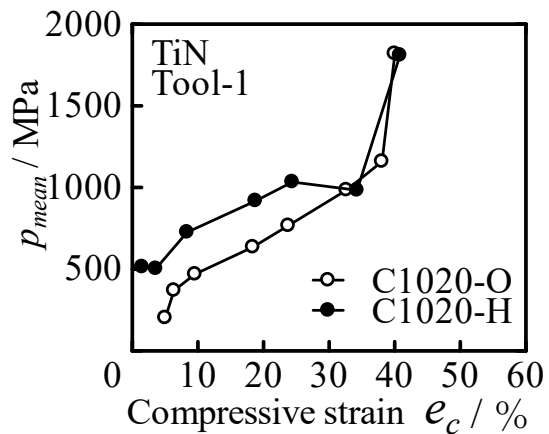


(c) TiN, Tool-2, 銅

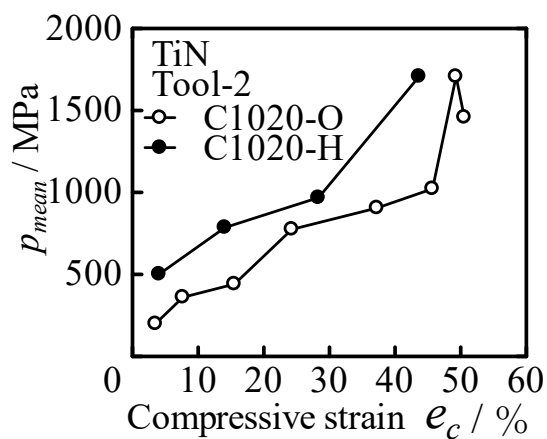
Fig.3.46 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係



(a) TiN, Tool-1, アルミニウム



(b) TiN, Tool-1, 銅



(c) TiN, Tool-2, 銅

Fig.3.47 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係

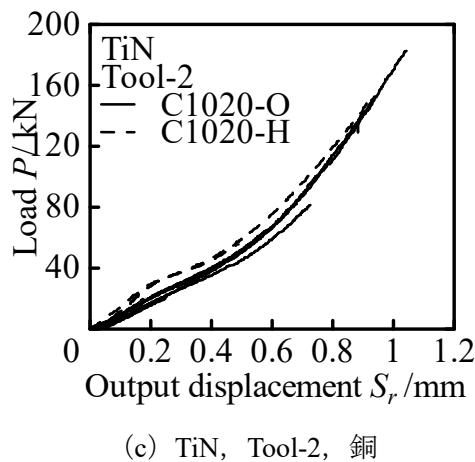
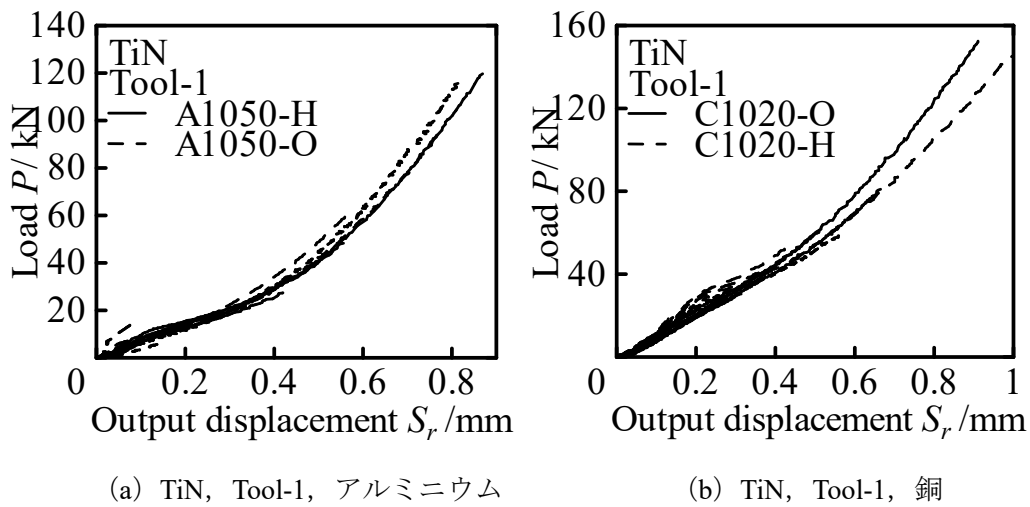


Fig.3.48 荷重 P と変位 S_r の関係

3.4.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

Fig.3.49 に TiN, Tool-1, アルミニウムの測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの測定箇所においても引抜き材と焼きなまし材の間に大きな差は見られない.

Fig.3.50 に TiN, Tool-1, 銅の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの圧縮率においても, 中心部では H 材の方が S_a が小さくなっているが, 外周部では大きな差は見られない. これは変形抵抗の大きい H 材の方が面圧による転写効果の影響が大きいからだと考えられる.

Fig.3.51 に TiN, Tool-2, 銅の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの測定箇所においても, 低圧縮率では H 材の方が S_a が小さくなっているが, 高圧縮率では大きな差は見られない. これより H 材の平滑化においては, 低圧縮率であっても面圧による転写効果の影響が十分に表れていると考えられる.

Fig.3.52 に TiN, Tool-1, アルミニウムの圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. 引抜き材と焼きなまし材において, 同程度の圧縮率であれば S_a と r の関係に大きな差は見られない.

Fig.3.53 に TiN, Tool-1, 銅の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. いずれの圧縮率においても S_a と r の関係に大きな差は見られない.

Fig.3.54 に TiN, Tool-2, 銅の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. H 材の $e_c=4\%$ では外周部で平滑化が進む傾向が見られるが, その他の圧縮率では S_a と r の関係に大きな差は見られない.

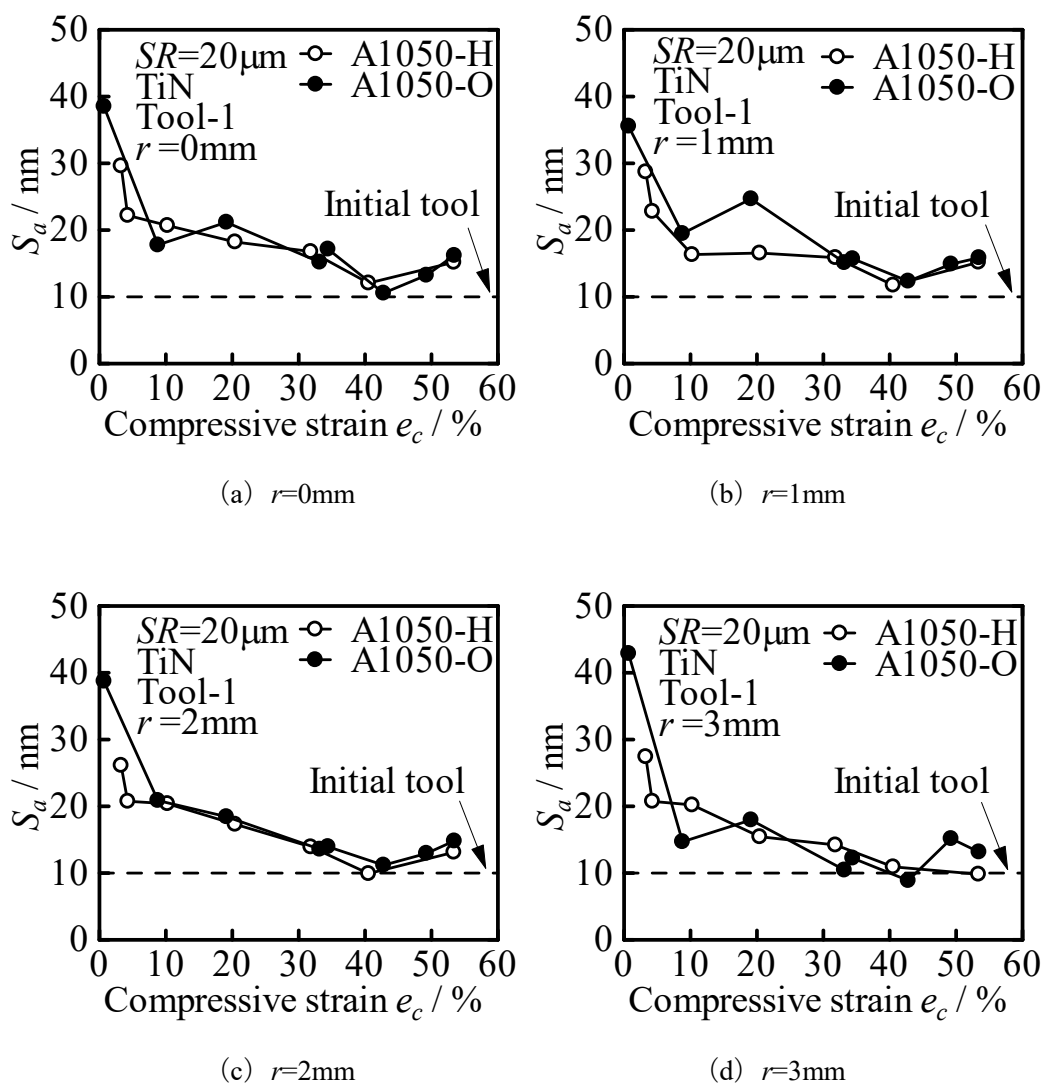


Fig.3.49 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, アルミニウム)

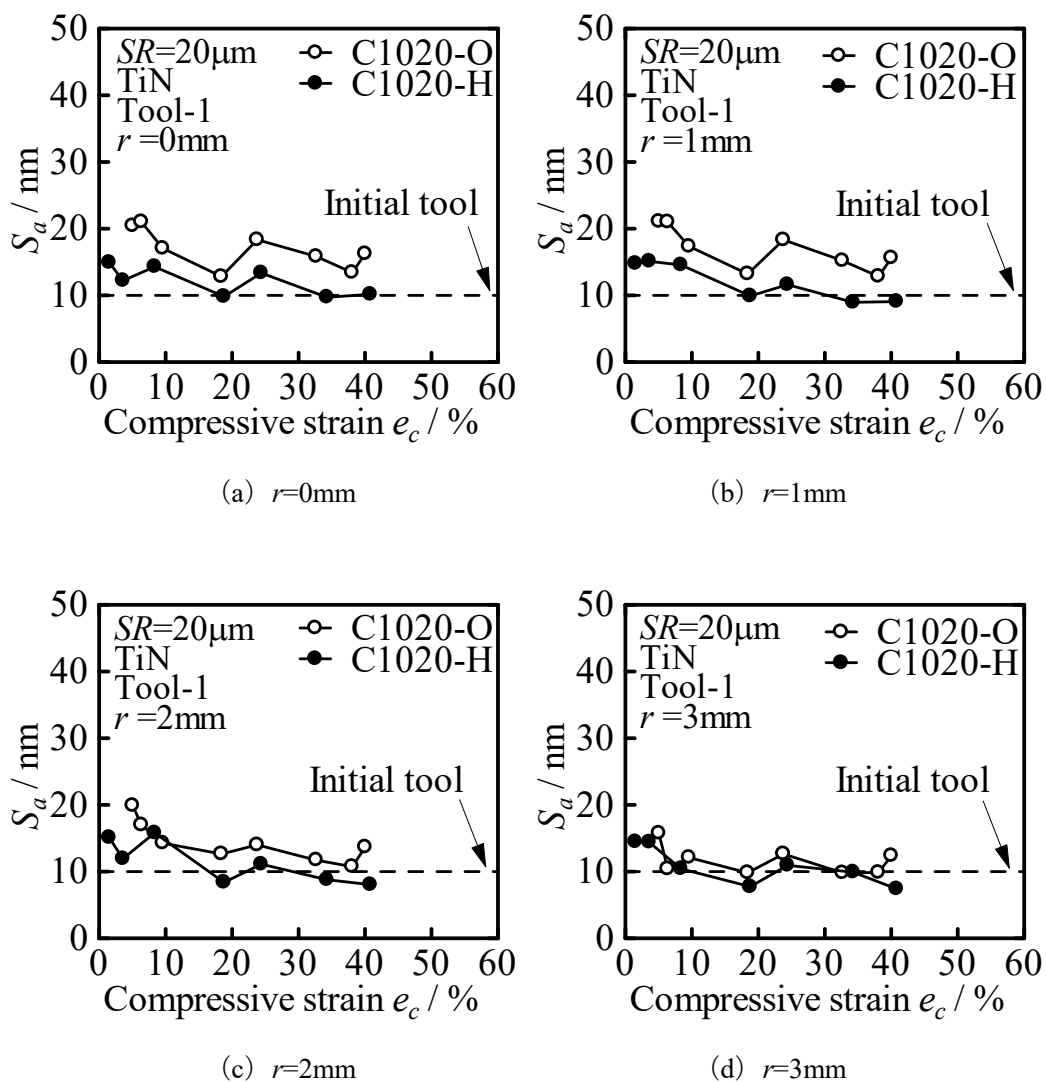


Fig.3.50 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, 銅)

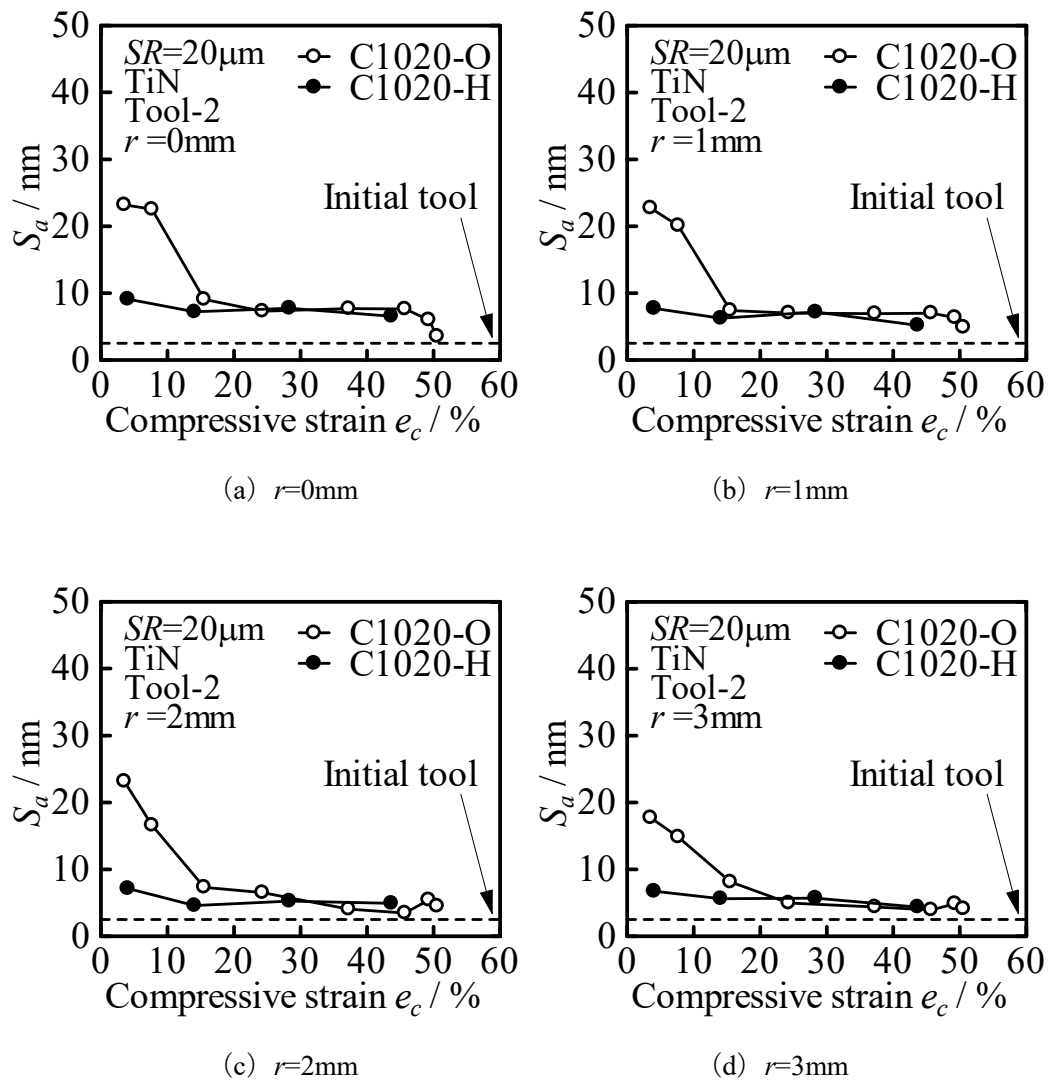


Fig.3.51 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-2, 銅)

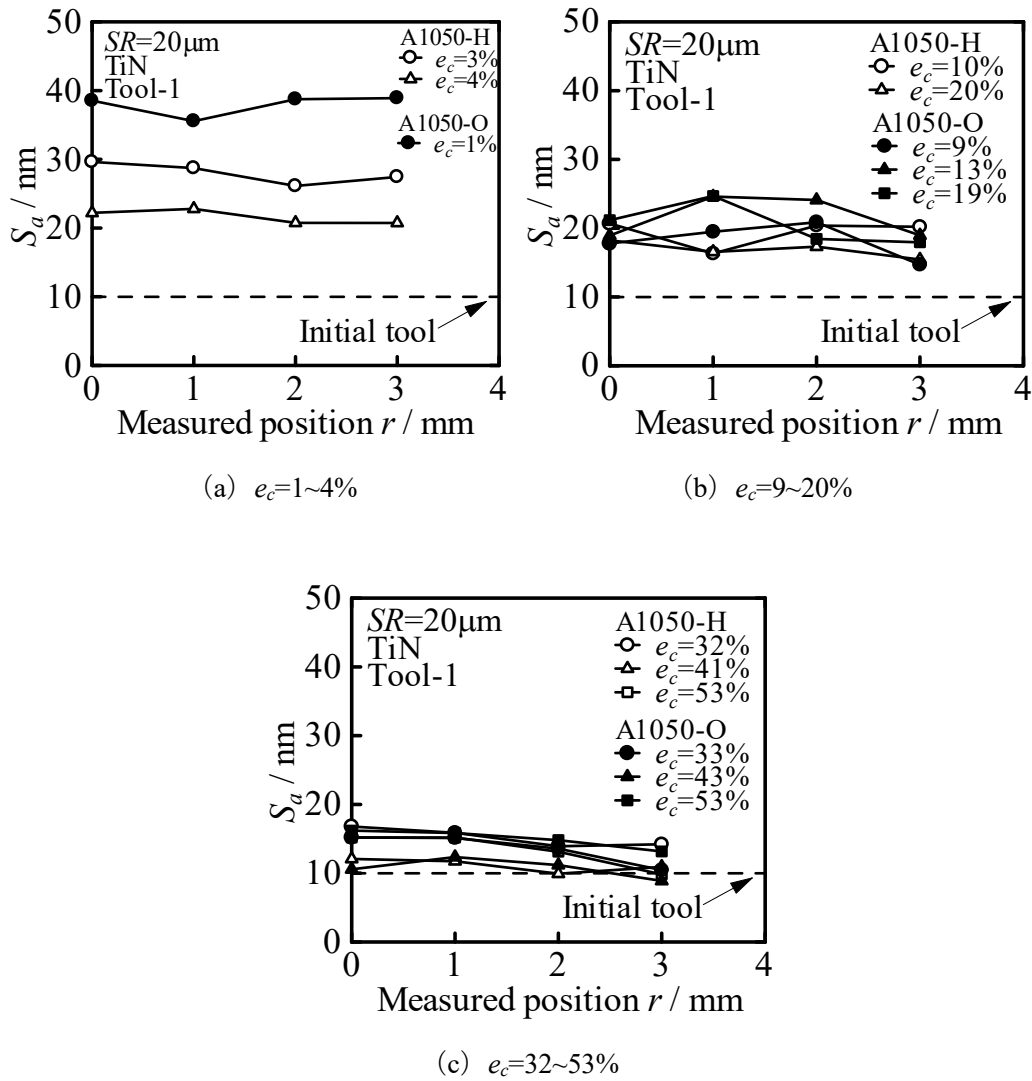
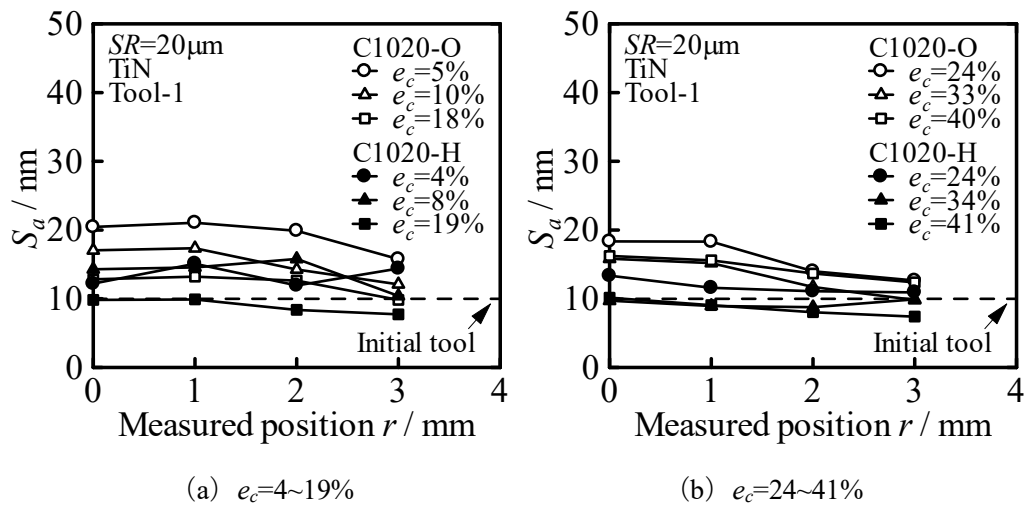
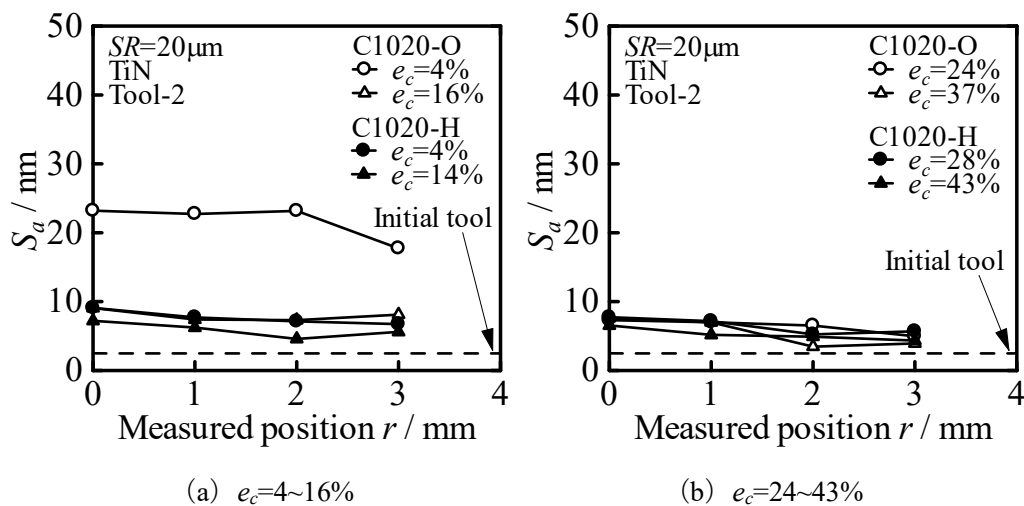


Fig.3.52 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (TiN, Tool-1, アルミニウム)

Fig.3.53 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (TiN, Tool-1, 銅)Fig.3.54 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (TiN, Tool-2, 銅)

3.4.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

Fig.3.55 に TiN, Tool-1, アルミニウムでの FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す. A1050-O では $e_c=9\%$, $e_c=19\%$ 以外の圧縮率についての FEM において本ソフトで設定可能な最大の摩擦係数 $\mu=0.577$ にして計算した最終荷重よりも, 実験値の方が大きくなったため, A1050-H での $e_c=10\%$, $e_c=20\%$ の結果との比較を行う. 同程度の圧縮率では引抜き材の方が焼きなまし材よりも面圧は大きくなる. また, すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる.

Fig.3.56 に TiN, Tool-1, 銅での FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す. C1020-H の $e_c=41\%$ については FEM において本ソフトウェアで設定できる最大摩擦係数 $\mu=0.577$ にして計算した最終荷重よりも, 実験値が大きくなったため, それ以外の結

果との比較を行う。同程度の圧縮率では引抜き材の方が焼きなまし材よりも面圧は大きくなる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.57 に TiN, Tool-2, 銅での FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。C1020-H の $e_c=43\%$ については FEM において本ソフトウェアで設定できる最大摩擦係数 $\mu=0.577$ にして計算した最終荷重よりも、実験値が大きくなったため、それ以外の結果との比較を行う。同程度の圧縮率では引抜き材の方が焼きなまし材よりも面圧は大きくなる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.58 に TiN, Tool-1, アルミニウムでの算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。すべり量による S_a のばらつきが大きく、引抜き材と焼きなまし材の間にはっきりとした傾向は見られない。

Fig.3.59 に TiN, Tool-1, 銅での算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。いずれの圧縮率においてもすべり量が小さいときは H 材の方が S_a が小さいが、すべり量が大きくなると S_a の差は小さくなる。

Fig.3.60 に TiN, Tool-2, 銅での算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。 $e_c=4\%$ の O 材ではすべり量が大きくなると平滑化が進む傾向が見られるが、その他ではすべり量による S_a の変化は見られない。

以上より、TiN, Tool-1, アルミニウムの条件において、圧縮率によらず H 材と O 材では大きな違いは見られず、測定箇所による違いも見られない。

TiN, Tool-1, 銅の条件において、圧縮率によらず、中心部では H 材の方が平滑化が進むが、外周部では大きな差は見られない。これは変形抵抗の大きい H 材の方が面圧による転写効果の影響が大きいからだと考えられる。

TiN, Tool-2, 銅の条件において、測定箇所によらず低圧縮率では H 材の方が平滑化が進むが、高圧縮率では大きな差は見られない。

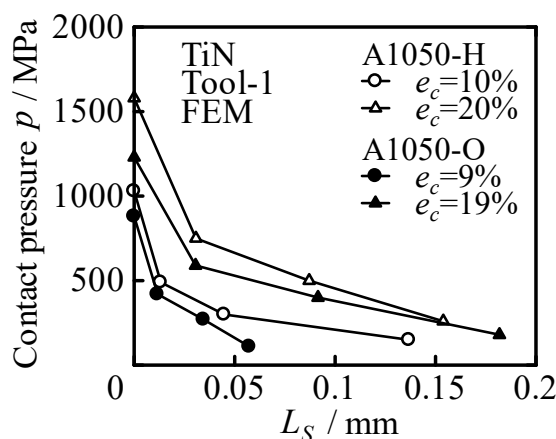
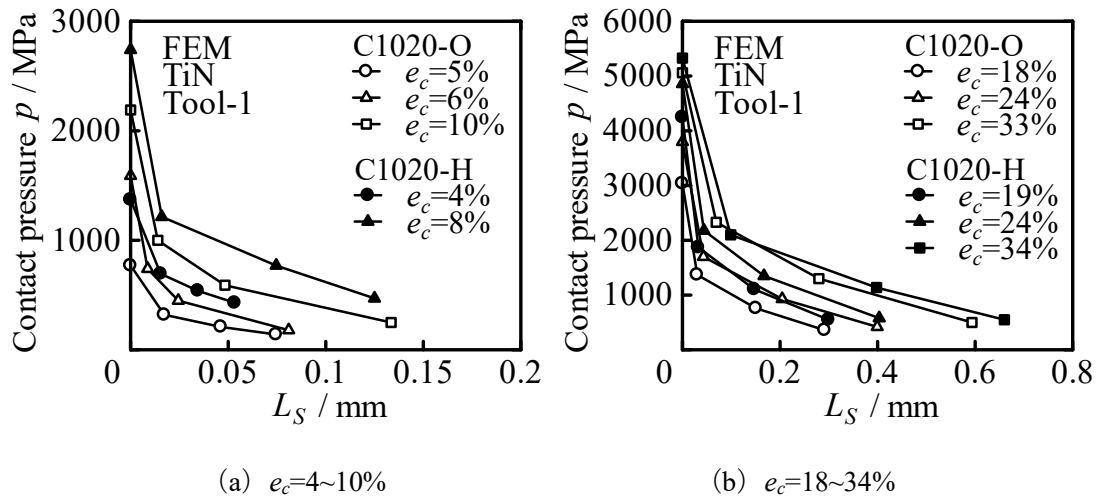
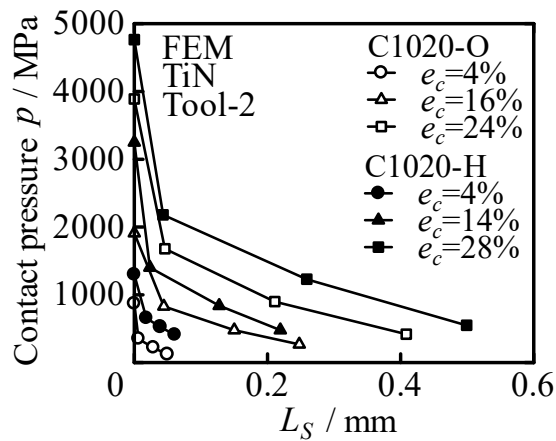
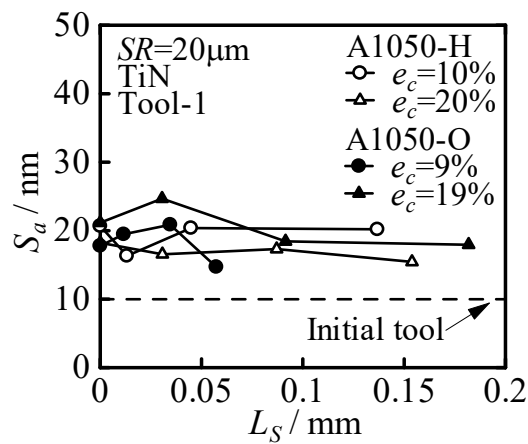


Fig.3.55 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-1, アルミニウム)

Fig.3.56 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-1, 銅)Fig.3.57 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-2, 銅)Fig.3.58 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-1, アルミニウム)

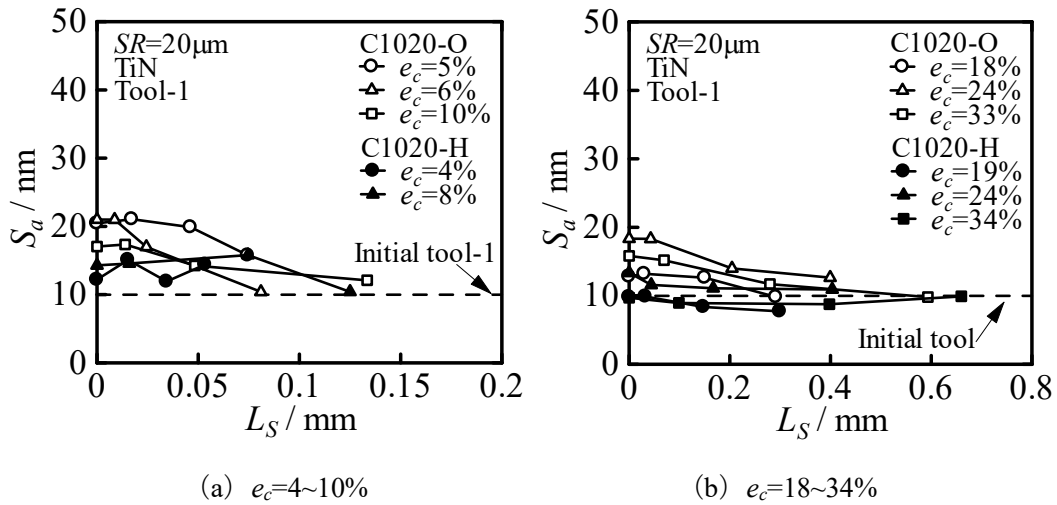


Fig.3.59 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-1, 銅)

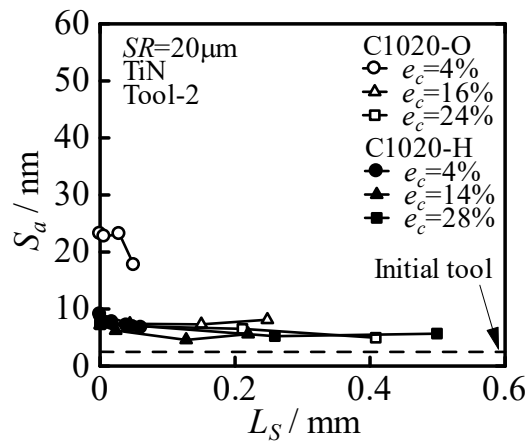


Fig.3.60 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-2, 銅)

3.5 工具表面粗さの影響

工具表面粗さの影響を調べるため、A1050-H における今回行った TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) の圧縮試験結果と過去に行った TiN コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) の圧縮試験結果⁽²⁵⁾の比較、今回行った C1020-O における TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) の圧縮試験結果と TiN コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) の圧縮試験結果の比較を行う。

3.5.1 圧縮率と表面粗さの関係

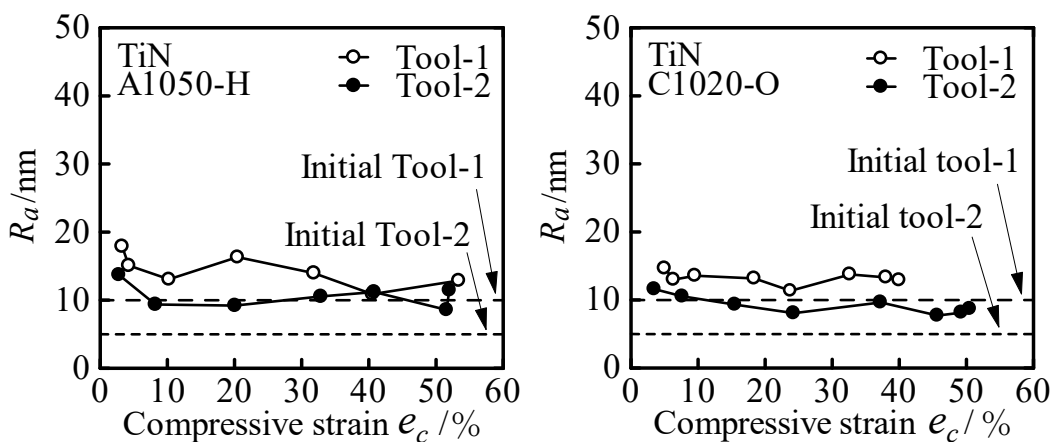
Fig.3.61 に各条件の触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。TiN, A1050-H では圧縮率 40%程度までは Tool-2 の方が R_a が小さくなり、それ以降は大きな差がないことがわかる。また、Tool-1 では圧縮率が高くなるにつれて R_a が小さく

なるが、Tool-2 においては圧縮率 10%以降では R_a が大きく変化しないことがわかる。

TiN, C1020-O ではいずれの圧縮率においても Tool-2 の方が R_a が小さくなっている。

Fig.3.62 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。TiN, A1050-H では Tool-1, Tool-2 とでは大きな違いは見られない。TiN, C1020-O では低圧縮率において大きな差は見られないが、高圧縮率において Tool-2 の方が平均面圧が大きくなっている。

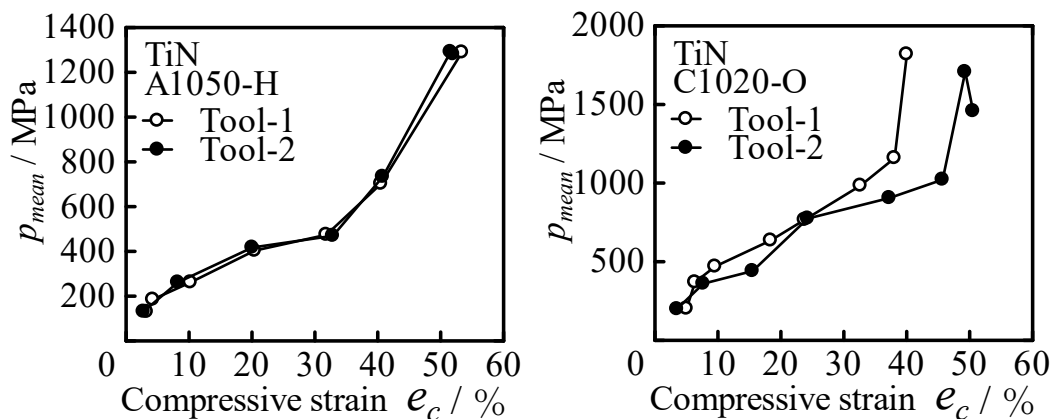
Fig.3.63 に荷重 P と変位 S_r の関係を示す。TiN, A1050-H では Tool-1, Tool-2 とでは大きな違いは見られない。TiN, C1020-O では高圧縮率において Tool-2 の方が荷重が大きくなる傾向が見られる。



(a) TiN, A1050-H

(b) TiN, C1020-O

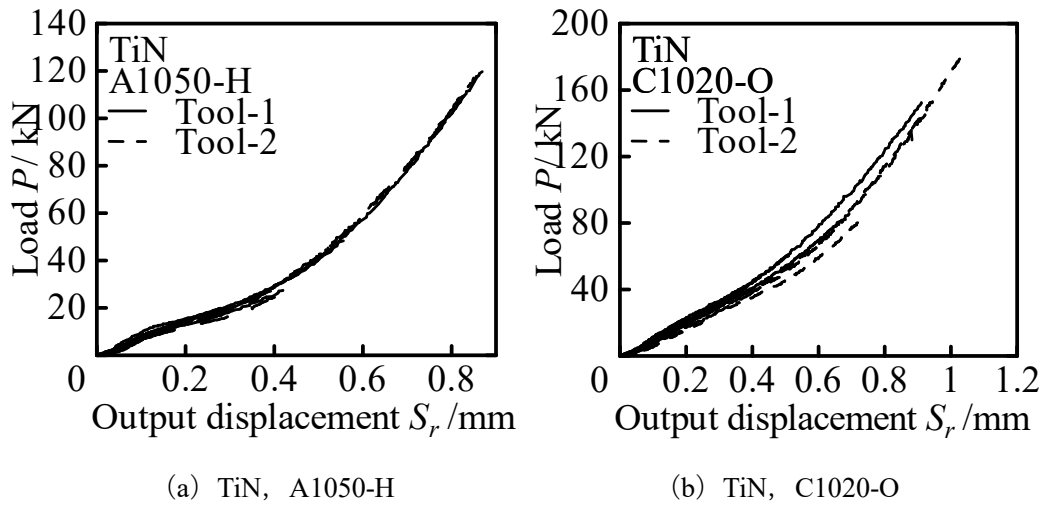
Fig.3.61 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係



(a) TiN, A1050-H

(b) TiN, C1020-O

Fig.3.62 平均面圧 P_{mean} と圧縮率 e_c の関係

Fig.3.63 荷重 P と変位 S_r の関係

3.5.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

Fig.3.64 に TiN, A1050-H の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの測定箇所においても加工初期では大きな違いはない. 圧縮率 10%から 30%程度までは Tool-2 の方が平滑化が進んでいる. それ以降では, 外周部において Tool-1 と Tool-2 では大きな差は見られない. また, Tool-1 では高圧縮率において初期工具表面粗さ程度の平滑度が得られるが, Tool-2 では初期工具表面粗さまで平滑化が進まない.

Fig.3.65 に TiN, C1020-O の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの測定箇所においても低圧縮率では大きな差は見られないが, 高圧縮率では Tool-2 の方が S_a が小さくなっている. 外周部では中心部と比べその差は小さくなり, Tool-1 の外周部では初期工具表面粗さと同程度の S_a となる.

Fig.3.66 に TiN, A1050-H の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. いずれの圧縮率においても同程度の圧縮率であれば Tool-1 に比べて Tool-2 の方が平滑化が進んでいることがわかる. また, 高圧縮率においては外周部になるにつれて Tool-1 と Tool-2 の差が小さくなっていることがわかる.

Fig.3.67 に TiN, C1020-O の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. いずれの圧縮率においても Tool-1 と Tool-2 で S_a と r の関係に大きな差は見られない.

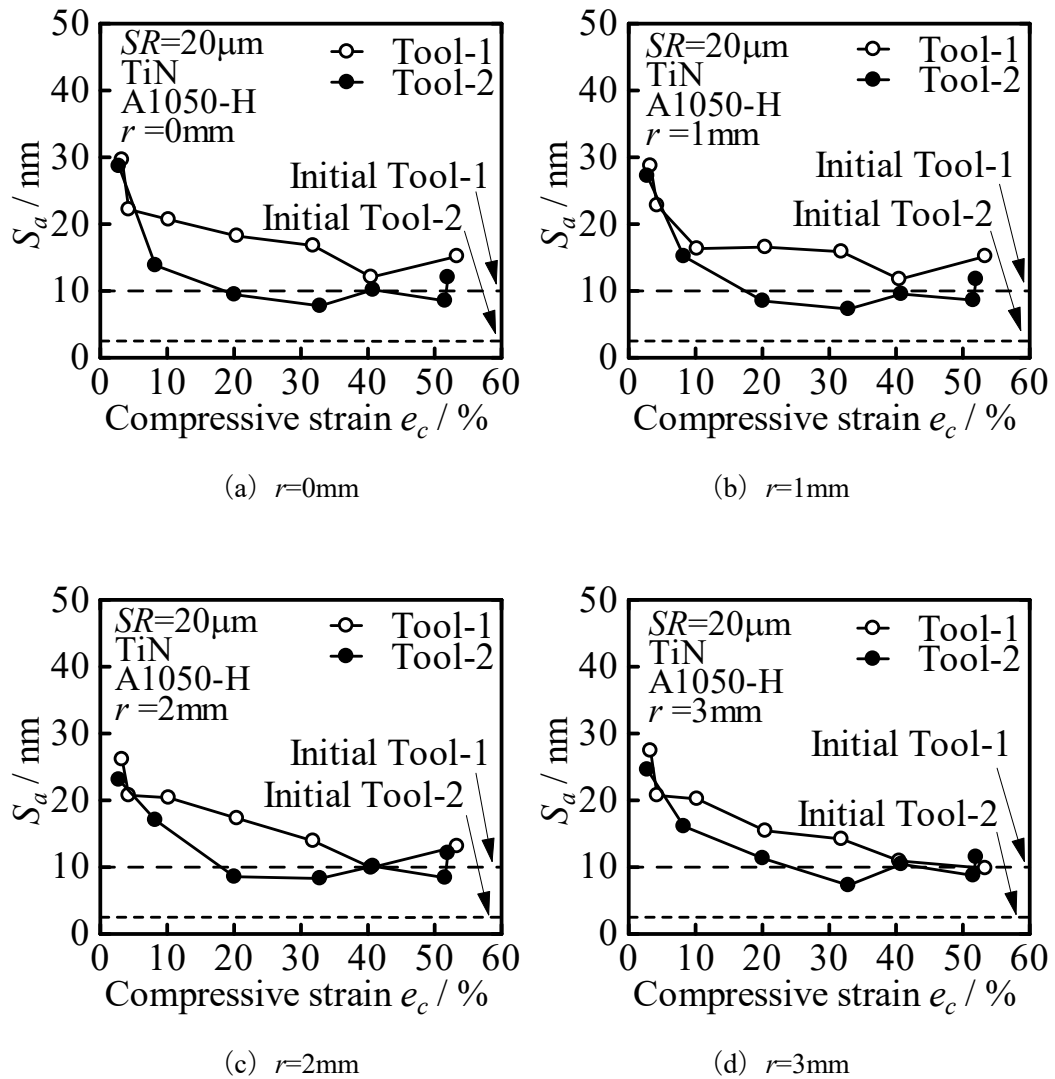


Fig.3.64 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, A1050-H)

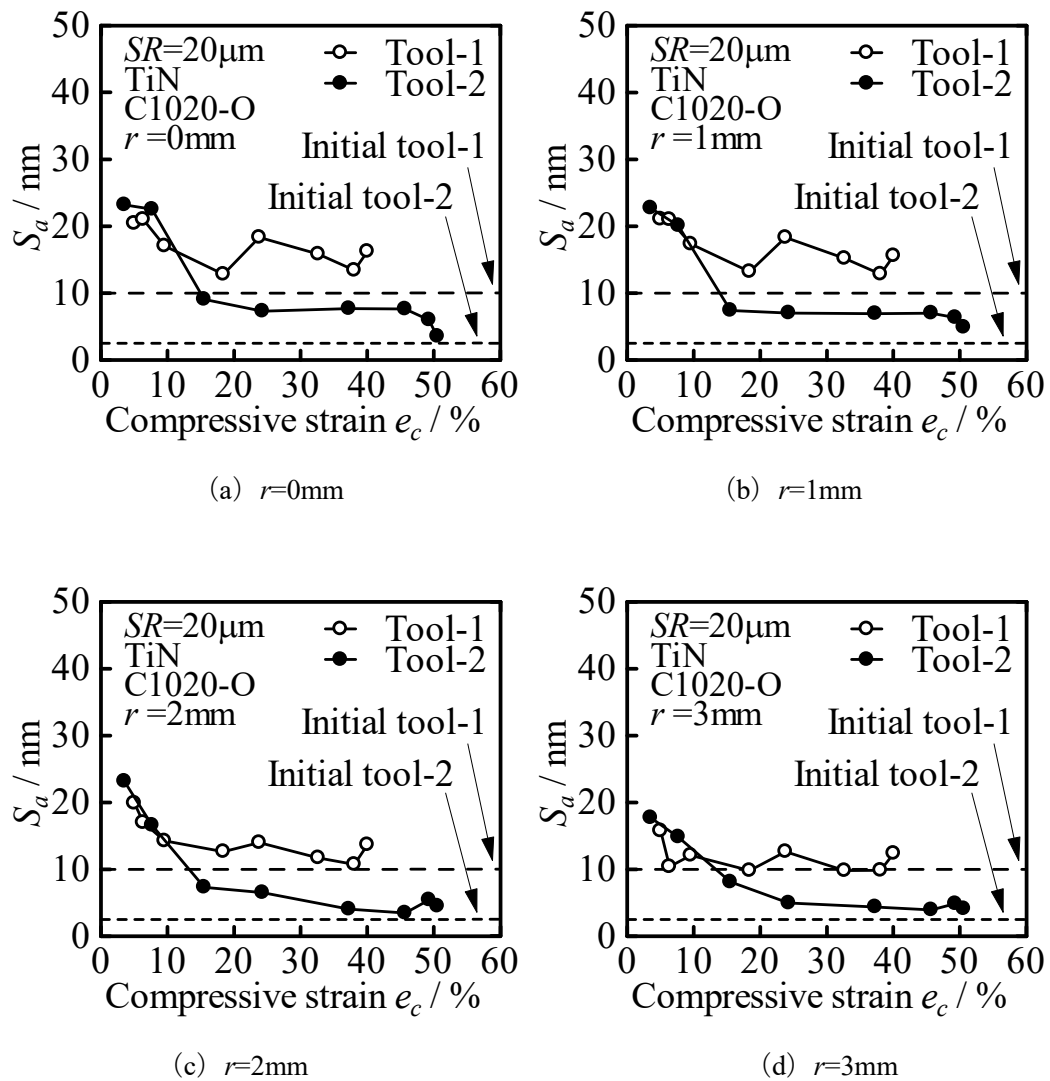


Fig.3.65 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, C1020-O)

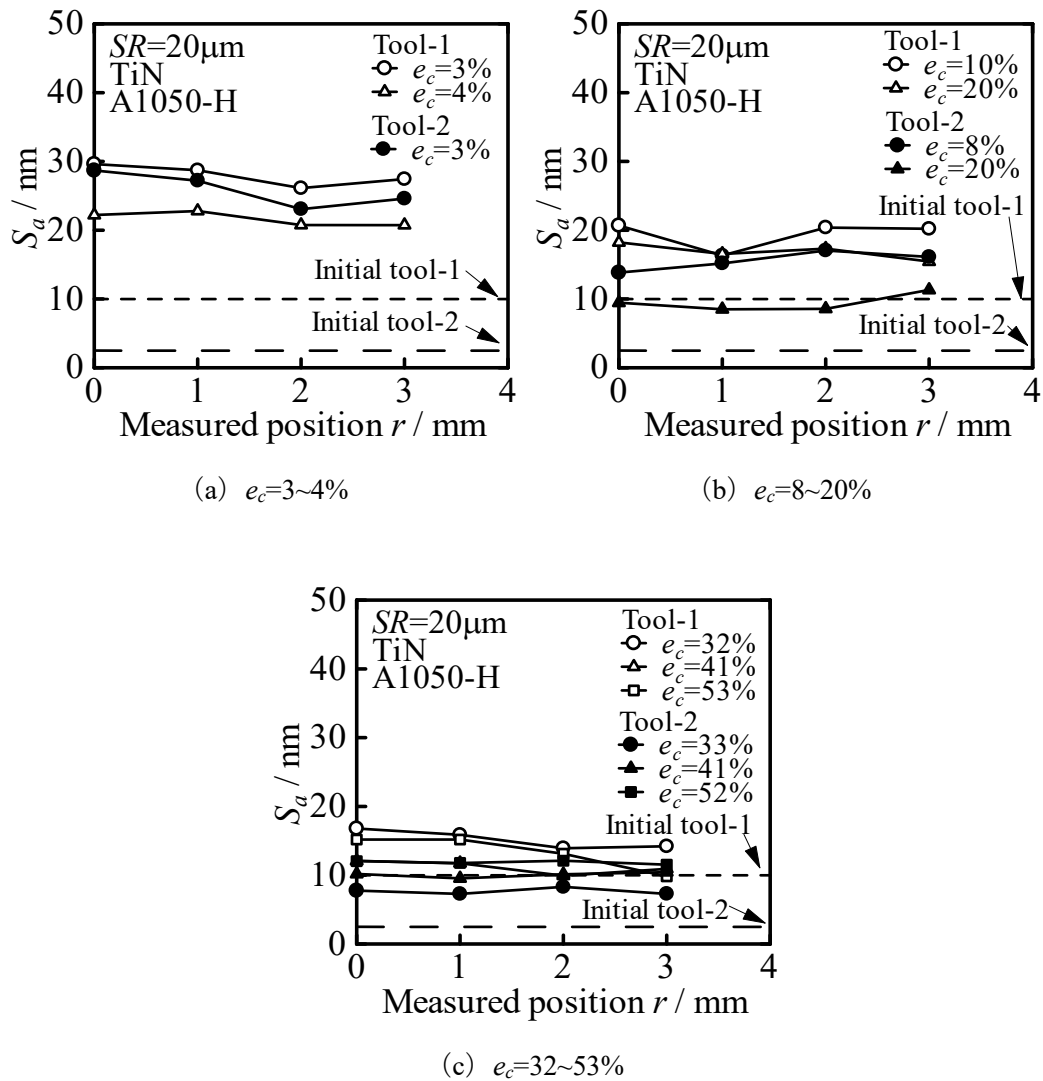


Fig.3.66 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (TiN, A1050-H)

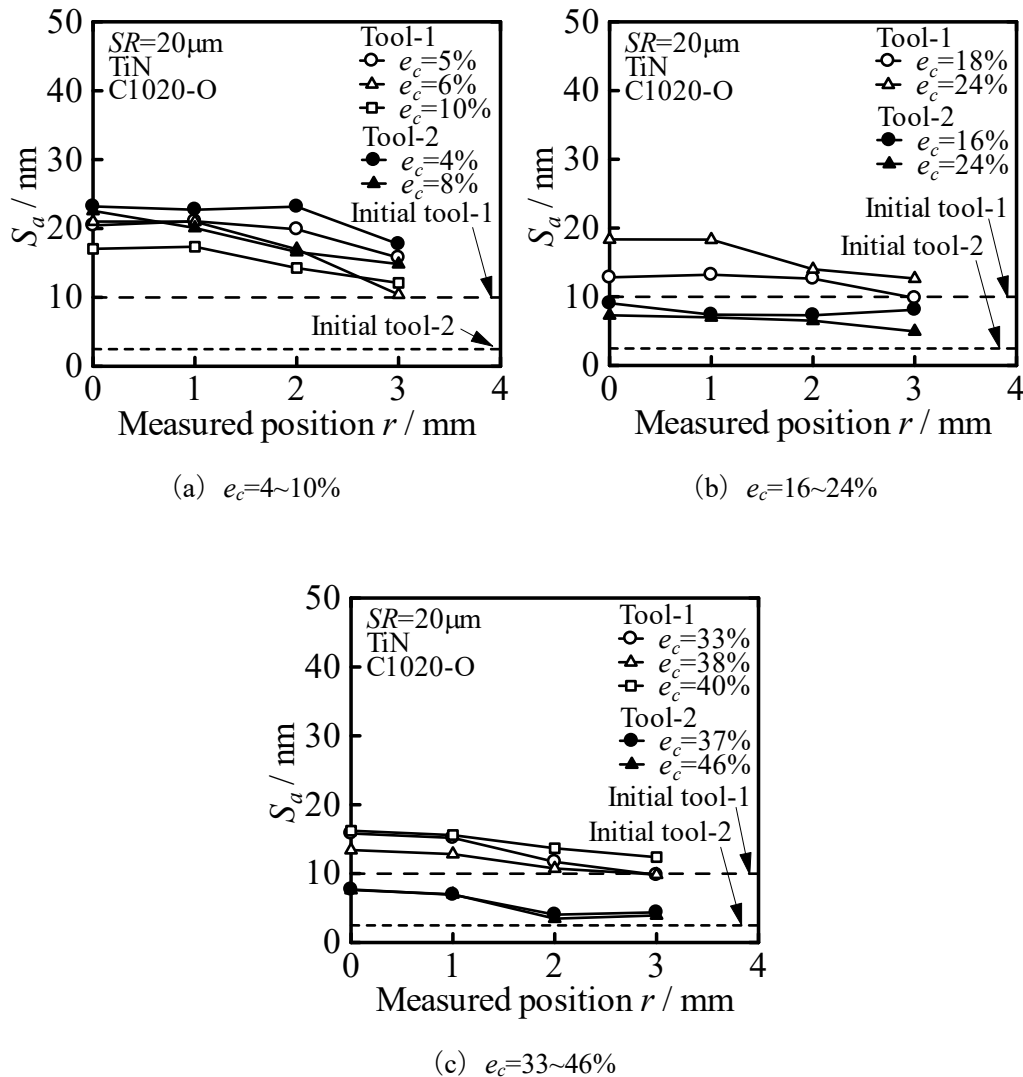


Fig.3.67 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (TiN, C1020-O)

3.5.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

Fig.3.68 に TiN, A1050-H の FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係を示す. Tool-1, Tool-2 とでは同程度の圧縮率では大きな違いは見られず, 圧縮率が大きくなると面圧が高くなり, すべり量が大きくなると面圧が小さくなる.

Fig.3.69 に TiN, C1020-O の FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係を示す. Tool-1, Tool-2 とでは同程度の圧縮率では大きな違いは見られず, 圧縮率が大きくなると面圧が高くなり, すべり量が大きくなると面圧が小さくなる.

Fig.3.70 に TiN, A1050-H の算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係を示す. すべり量による S_a の変化は小さく, 同程度の圧縮率, すべり量において Tool-2 のほうが S_a は小さくなる.

Fig.3.71 に TiN, C1020-O の算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係を示す. 低圧縮率

では Tool-1 と Tool-2 に大きな差は見られないが、高圧縮率では Tool-2 と比べ Tool-1 の方がすべり量による S_a の変化が大きい傾向が見られる。

以上より、TiN, A1050-H では、工具表面粗さの大きい Tool-1 に比べ粗さの小さい Tool-2 の方が明らかに平滑化される。Tool-1 では高圧縮率において初期工具表面粗さ程度の平滑化が得られるが、Tool-2 では初期工具表面粗さまで平滑化が進まない。

TiN, C1020-O では、いずれの測定箇所においても低圧縮率では大きな差は見られないが、高圧縮率では Tool-2 の方が平滑化が進む。外周部では中心部と比べその差は小さくなり、Tool-1 の外周部では初期工具表面粗さ程度まで平滑化が進む。

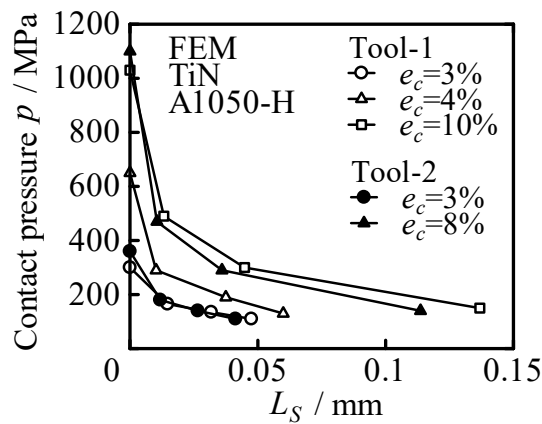
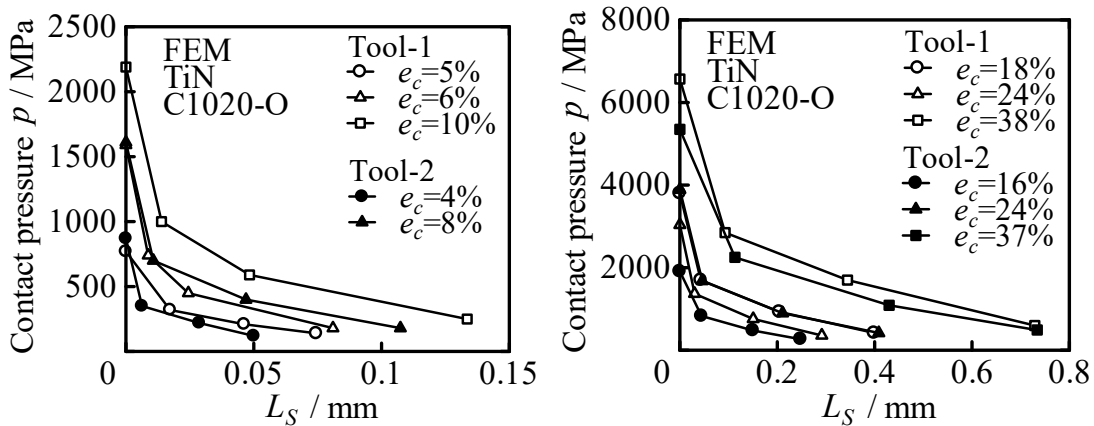


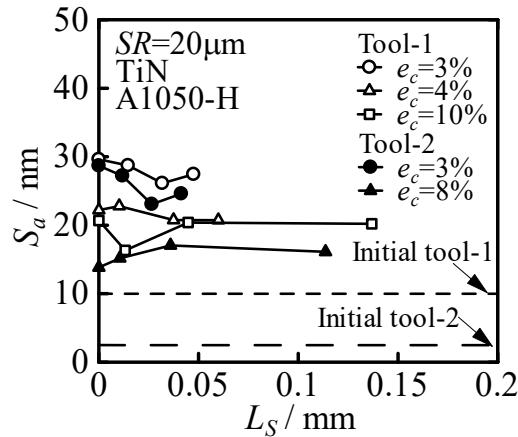
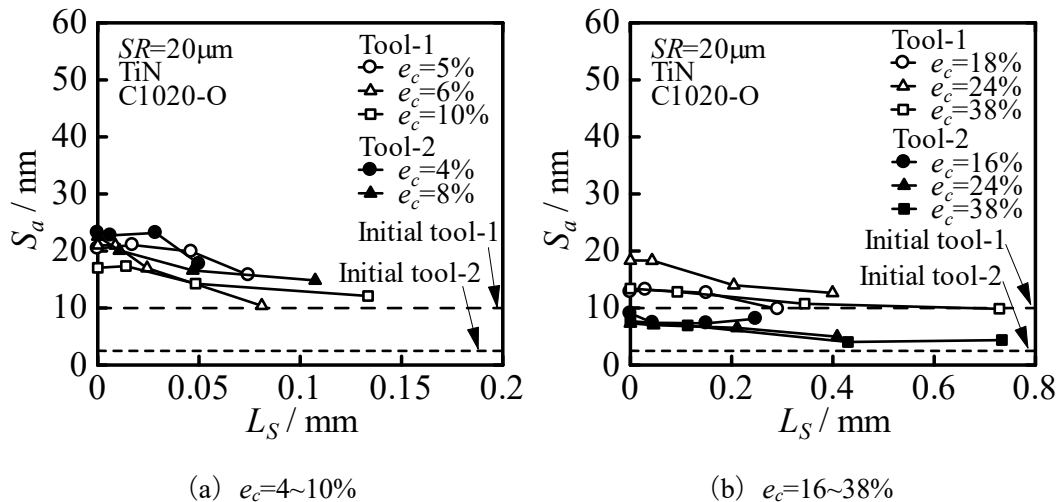
Fig.3.68 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係 (TiN, A1050-H)



(a) $e_c=4\sim 10\%$

(b) $e_c=16\sim 38\%$

Fig.3.69 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係 (TiN, C1020-O)

Fig.3.70 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, A1050-H)Fig.3.71 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, C1020-O)

3.6 材料の影響

材料の違いによる平滑化の挙動を調べるため、TiN コーティングを施した Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) において今回行った A1050-H の圧縮試験結果と過去に行った C1020-H の圧縮試験結果⁽²⁴⁾の比較、TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った C1020-O の圧縮試験結果と過去に行った A1050-O の圧縮試験結果⁽²⁵⁾の比較、TiN コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った C1020-O の圧縮試験結果と過去に行った A1050-O の圧縮試験結果⁽²⁵⁾の比較を行う。

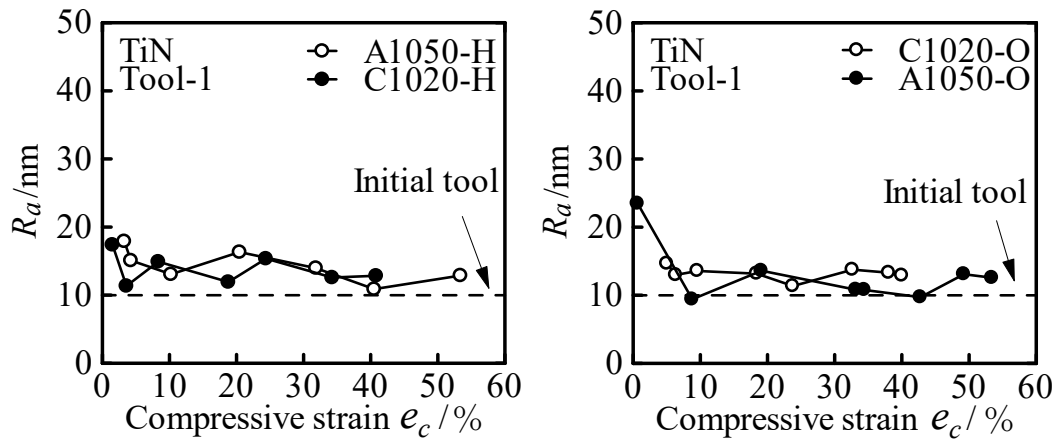
3.6.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.72 に各条件の触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。TiN, Tool-1, H 材と TiN, Tool-1, O 材では、いずれの圧縮率においても大きな差は見られない。TiN, Tool-2, O 材では低圧縮率において銅の方が R_a が小さくなっている。高

圧縮率では大きな差は見られない。

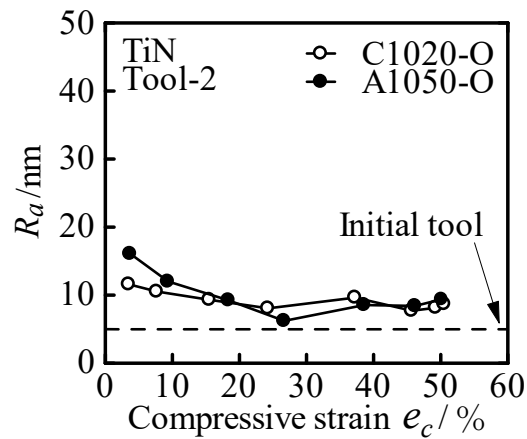
Fig.3.73 に各条件の平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの条件でもすべての圧縮率において銅の方が平均面圧は高くなることわかる。

Fig.3.74 に各条件の荷重 P と変位 S_r の関係を示す。いずれの条件でも銅の方が荷重が大きくなっている。



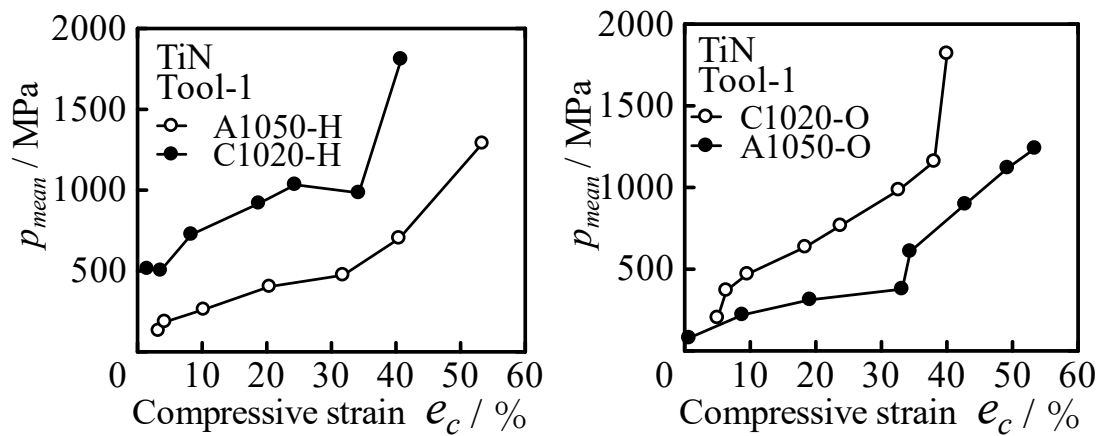
(a) TiN, Tool-1, H材

(b) TiN, Tool-1, O材



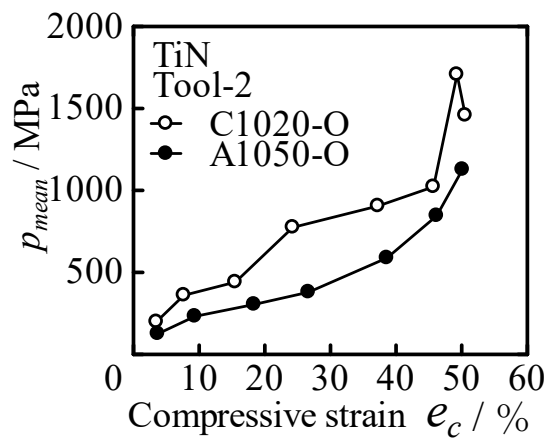
(c) TiN, Tool-2, O材

Fig.3.72 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係



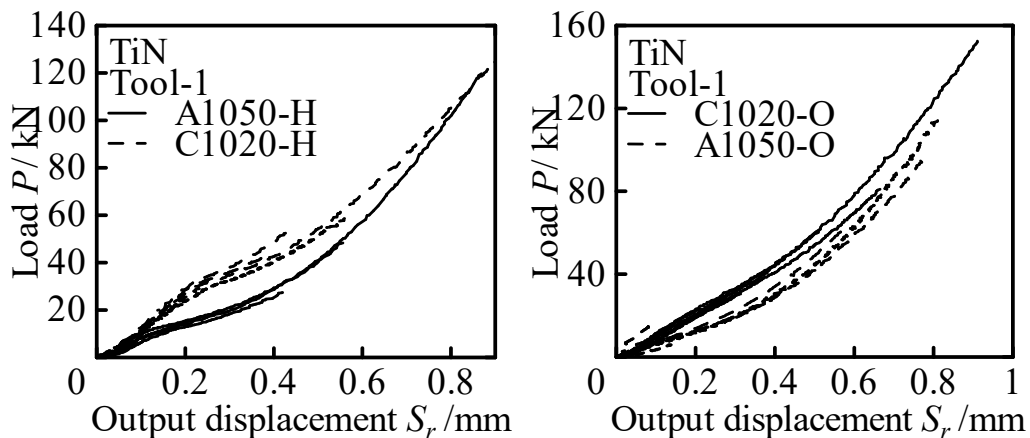
(a) TiN, Tool-1, H材

(b) TiN, Tool-1, O材



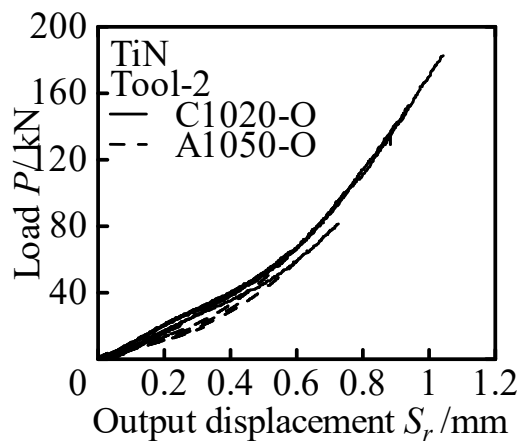
(c) TiN, Tool-2, O材

Fig.3.73 平均面圧 P_{mean} と圧縮率 e_c の関係



(a) TiN, Tool-1, H材

(b) TiN, Tool-1, O材



(c) TiN, Tool-2, O材

Fig.3.74 荷重 P と変位 S_r の関係

3.6.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

Fig.3.75 に TiN, Tool-1, H 材の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの測定箇所においても銅の方が S_a が小さくなっており, 加工初期ではその差は大きい. これは銅の方が面圧が高く, 転写効果によって平滑化がより進んだと考えられる. しかし, 変形抵抗の大きい銅の方が平滑化が進みにくいとも考えられるため, はっきりとした理由は不明である. 今後, 同程度の変形抵抗をもつ別の材料で実験を行うなどしてさらに調べる必要がある.

Fig.3.76 に TiN, Tool-1, O 材の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 中心部ではいずれの圧縮率においても大きな差は見られないが, 外周部では低圧縮率において銅の方が S_a が小さく, 高圧縮率では大きな差は見られない. これは低圧縮率の外周部において Fig.3.77 に示すように, 銅の方がアルミニウ

ムよりも r 方向に材料流動の様子がはっきりと見られることから、銅の方が材料流動によるしごき効果が大きくなっていると考えられる。しかし、理由は不明であるため、別の材料の実験などによりさらに調べる必要がある。

Fig.3.78 に TiN, Tool-2, O 材の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの測定箇所でも低圧縮率においては銅の方が S_a が小さく、高圧縮率では大きな差は見られない。これは銅の方が面圧が高く、低圧縮率ではアルミニウムと比べ転写効果により平滑化が進んだと考えられるが、はっきりとした理由は不明である。

Fig.3.79 に TiN, Tool-1, H 材の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。銅とアルミニウムともに測定箇所による大きな差は見られない。加工初期では銅とアルミニウムで S_a の差が大きくなっている。

Fig.3.80 に TiN, Tool-1, O 材の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。低圧縮率では銅の方が中心部比べ外周部でより S_a が小さくなる傾向が見られる。高圧縮率では大きな差は見られない。

Fig.3.81 に TiN, Tool-2, O 材の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。 $e_c=4\%$ においてアルミニウムでは中心部と比べ外周部でより S_a が大きくなっている。その他の圧縮率では大きな差は見られない。

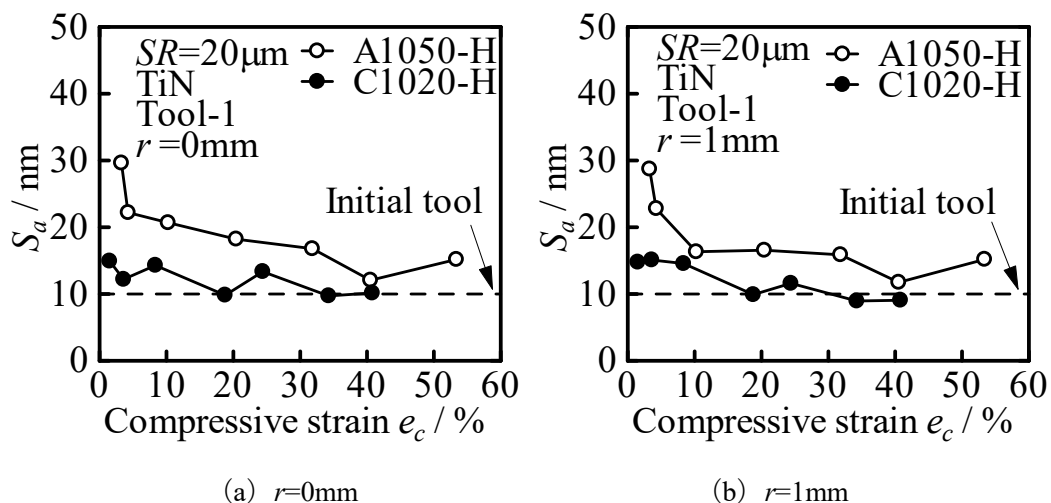
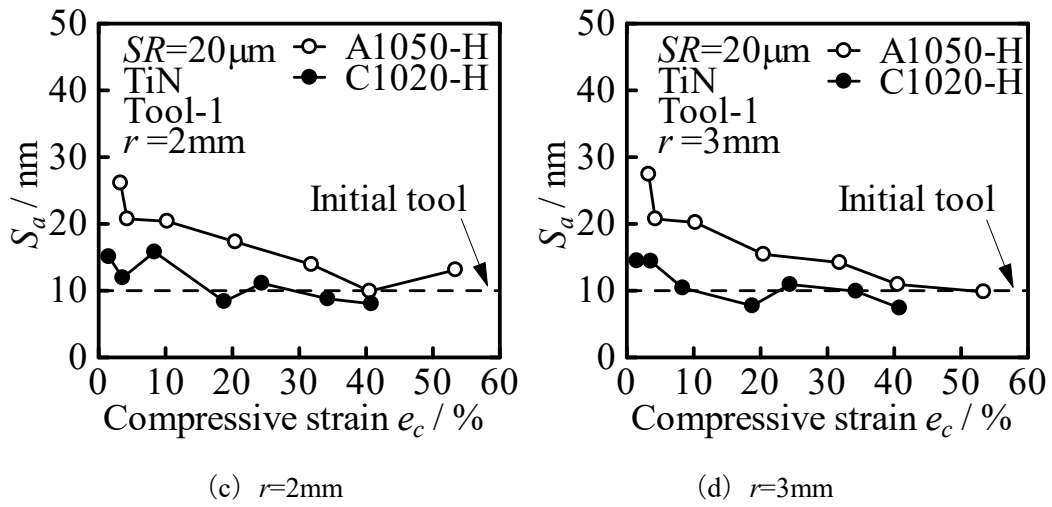
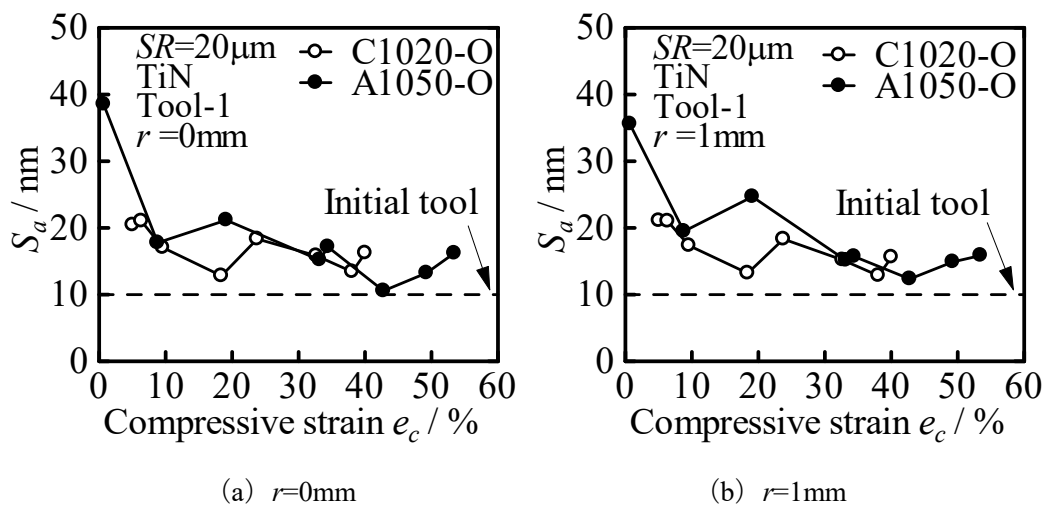
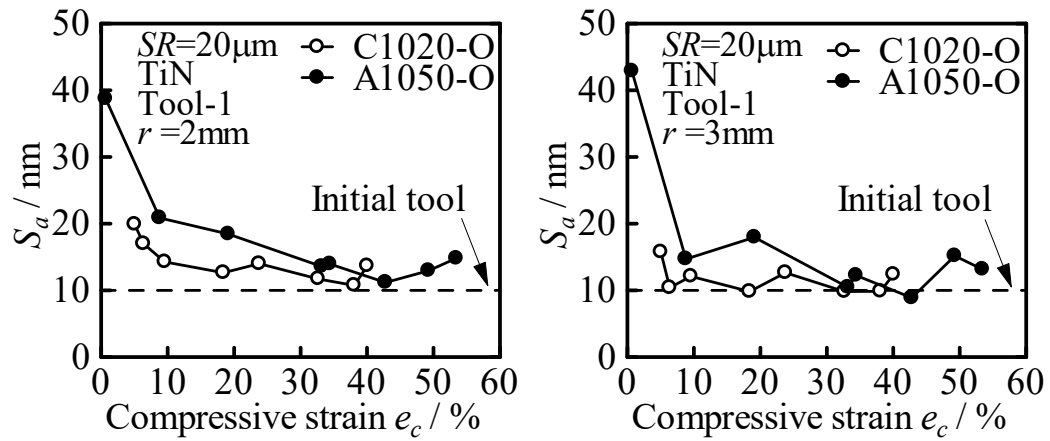
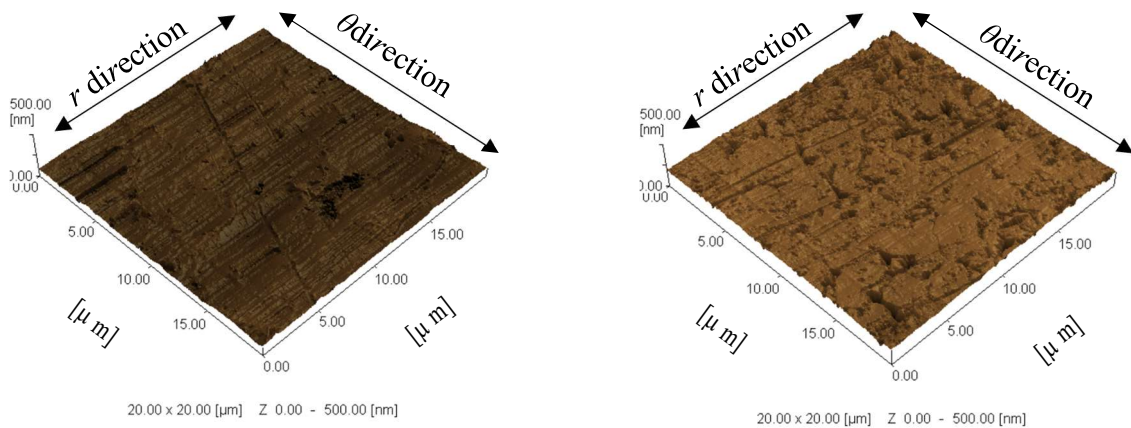


Fig.3.75 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, H 材)

Fig.3.75 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, H 材)Fig.3.76 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, O 材)

(c) $r=2\text{mm}$ (d) $r=3\text{mm}$ Fig.3.76 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, O材)(a) C1020-O, $e_c=10\%$ (b) A1050-O, $e_c=9\%$ Fig.3.77 圧縮試験後の $r=3\text{mm}$ での AFM 像 (TiN, Tool-1, O材)

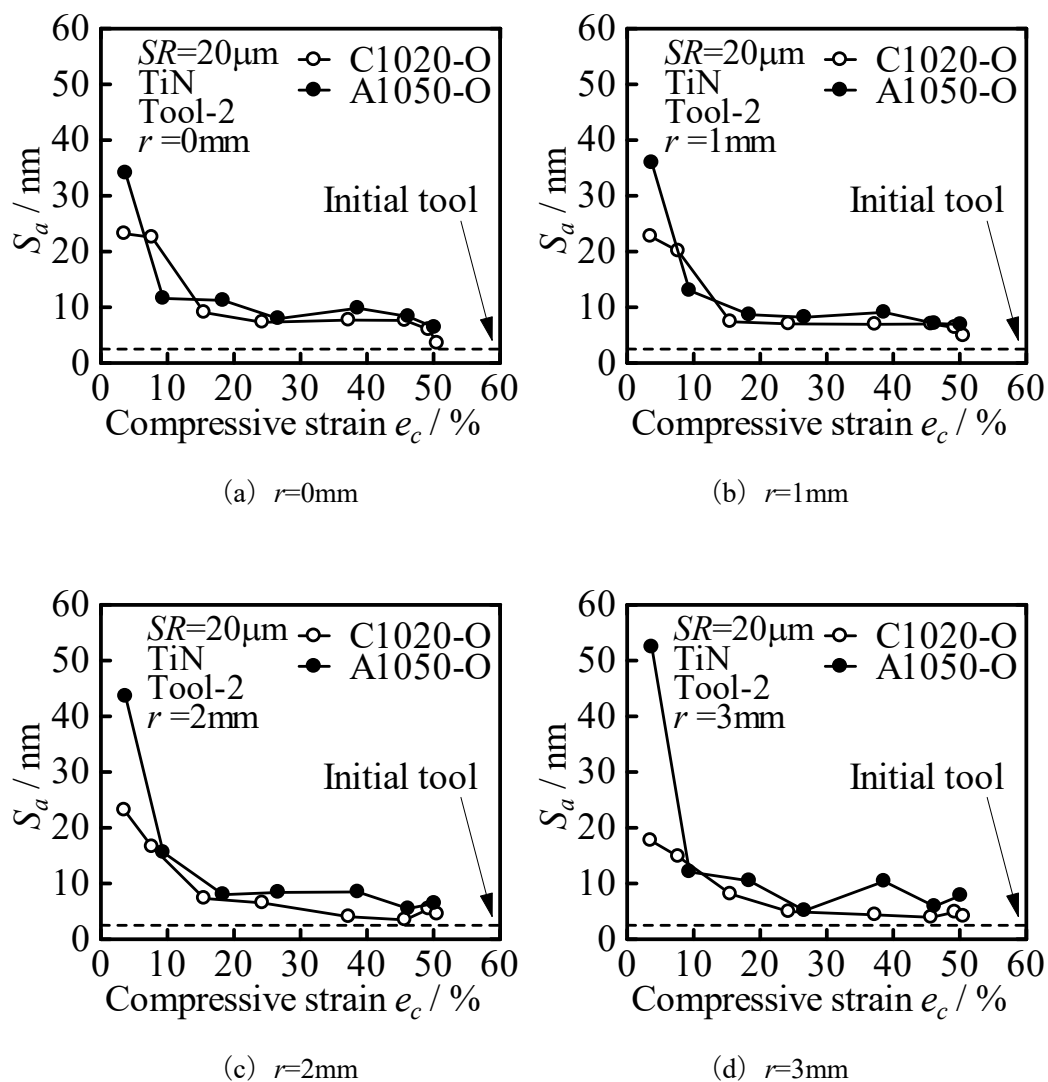
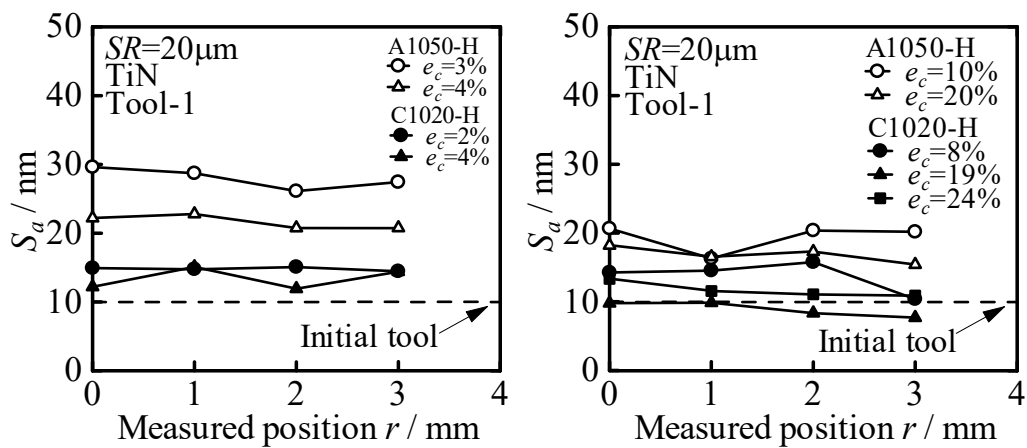
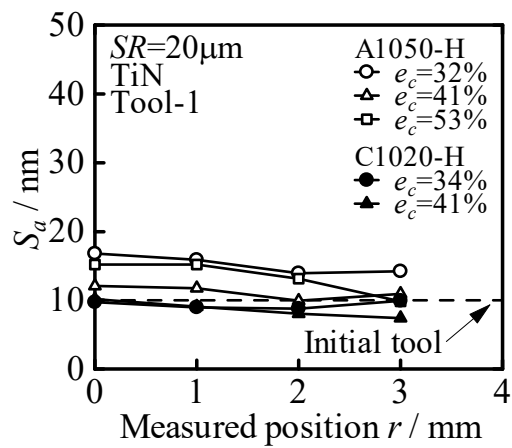
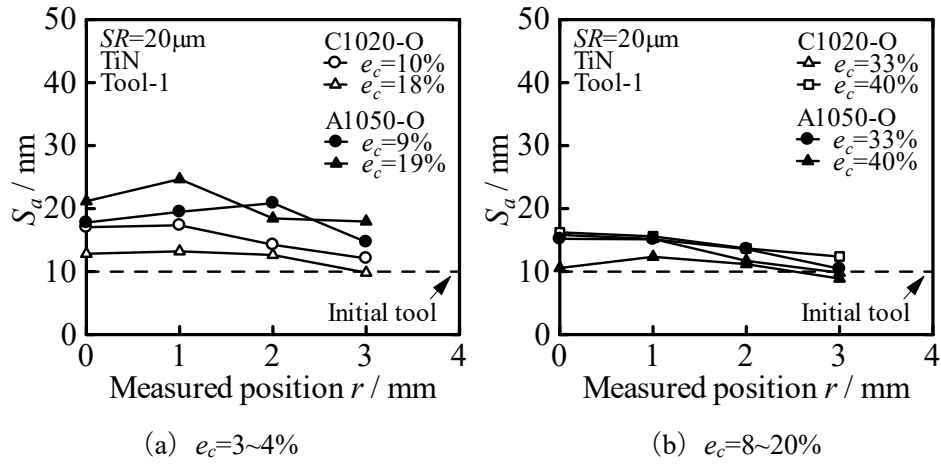
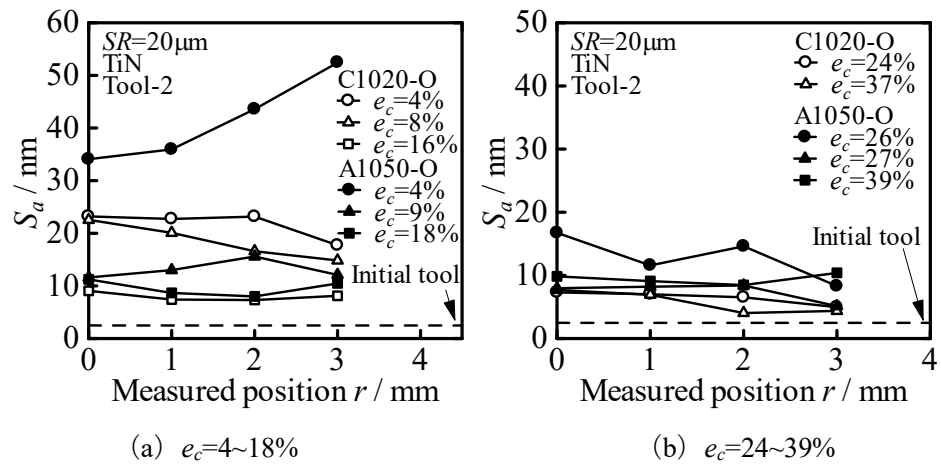
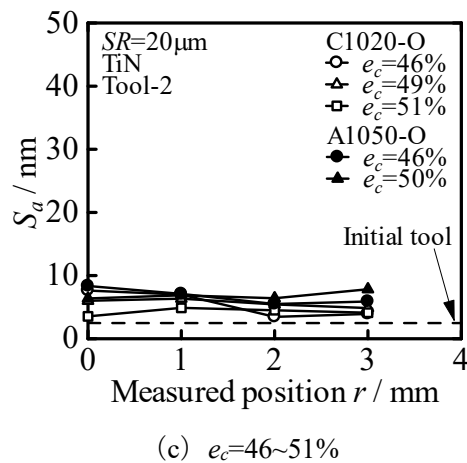


Fig.3.78 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-2, O材)

(a) $e_c=2\sim 4\%$ (b) $e_c=8\sim 24\%$ (c) $e_c=32\sim 53\%$ Fig.3.79 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (TiN, Tool-1, H 材)

Fig.3.80 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (TiN, Tool-1, O 材)(a) $e_c=4\sim 18\%$ (b) $e_c=24\sim 39\%$ (c) $e_c=46\sim 51\%$ Fig.3.81 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (TiN, Tool-2, O 材)

3.6.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

Fig.3.82 に TiN, Tool-1, H 材の FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。同程度の圧縮率では銅の方がアルミニウムよりも面圧は大きくなる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.83 に TiN, Tool-1, O 材の FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。同程度の圧縮率では銅の方がアルミニウムよりも面圧は大きくなる。

Fig.3.84 に TiN, Tool-2, O 材の FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。同程度の圧縮率では銅の方がアルミニウムよりも面圧は大きくなる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.85 に TiN, Tool-1, H 材の算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。いずれの圧縮率でもすべり量によらず銅の方が S_a が小さくなっている。低圧縮率ではその差が大きいことがわかる。

Fig.3.86 に TiN, Tool-1, O 材の算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。いずれの圧縮率でもすべり量によらず銅の方が S_a が小さくなっている。アルミニウムの方がすべり量による S_a の変化が大きいことがわかる。

Fig.3.87 に TiN, Tool-2, O 材の算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。低圧縮率ではすべり量によらず銅の方が S_a が小さくなる傾向が見られ、すべり量が小さいほどその傾向が大きくなる。高圧縮率では銅とアルミニウムに大きな違いは見られない。

以上より、TiN, Tool-1, H 材では、いずれの測定箇所においても銅の方が平滑化が進み、加工初期ではその差は大きい。これは銅の方が面圧が高く、転写効果により平滑化が進んだと考えられるが、はっきりとした理由は不明である。

TiN, Tool-1, O 材では、中心部ではいずれの圧縮率においても大きな差は見られないが、外周部では低圧縮率において銅の方が平滑化が進み、高圧縮率では大きな差は見られない。これは低圧縮率においては銅の方が材料流動の影響が大きくなったためだと考えられるが、はっきりとした理由は不明である。

TiN, Tool-2, O 材では、いずれの測定箇所でも低圧縮率においては銅の方が平滑化が進み、高圧縮率では大きな差は見られない。これは銅の方が面圧が高く、低圧縮率ではアルミニウムと比べ転写効果により平滑化が進んだと考えられるが、はっきりとした理由は不明である。

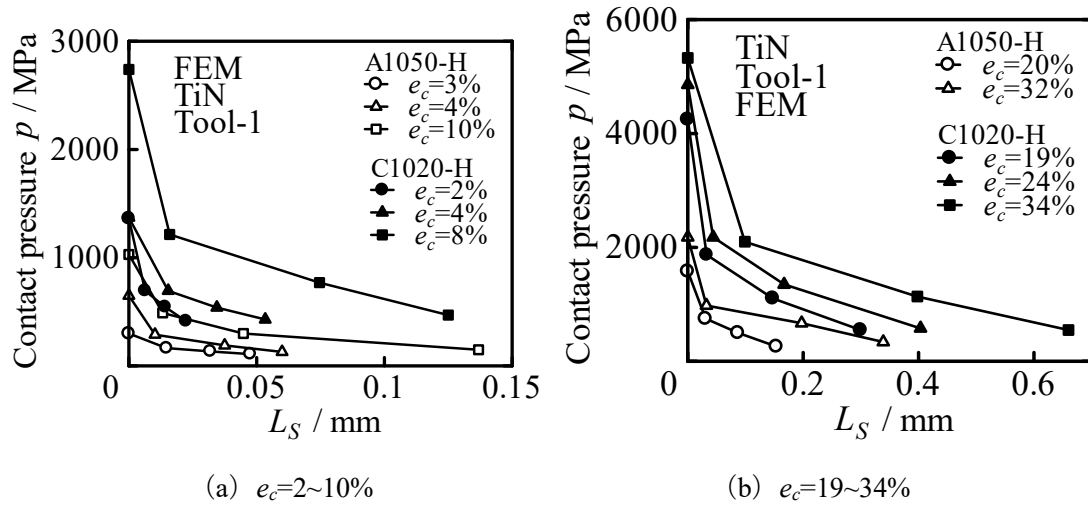


Fig.3.82 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-1, H材)

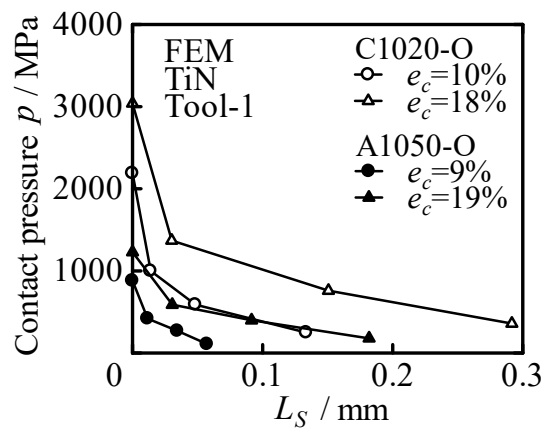


Fig.3.83 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-1, O材)

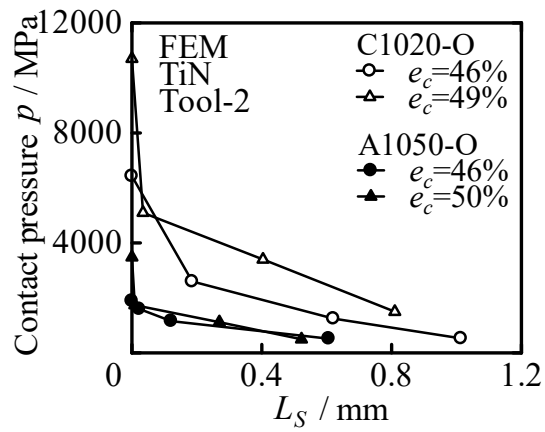
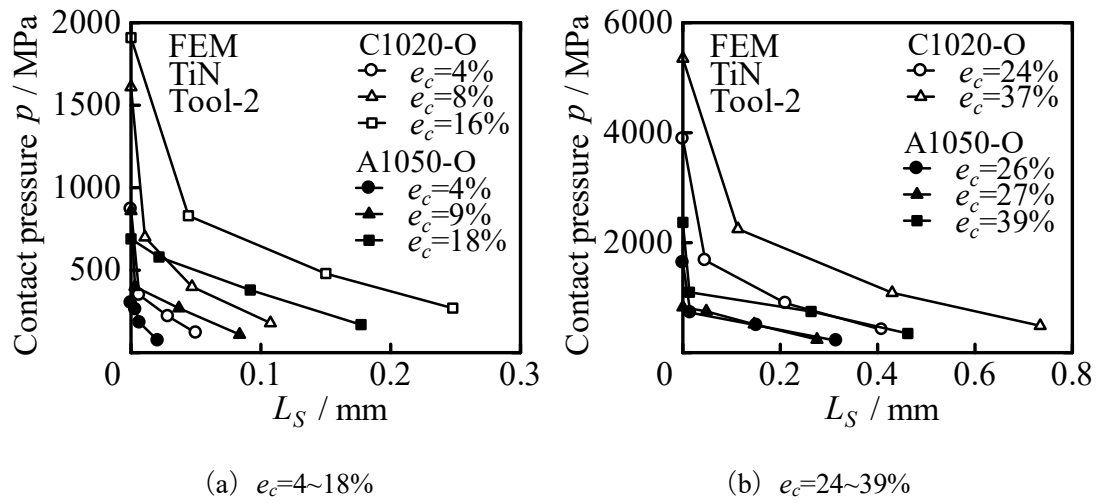


Fig.3.84 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-2, O材)

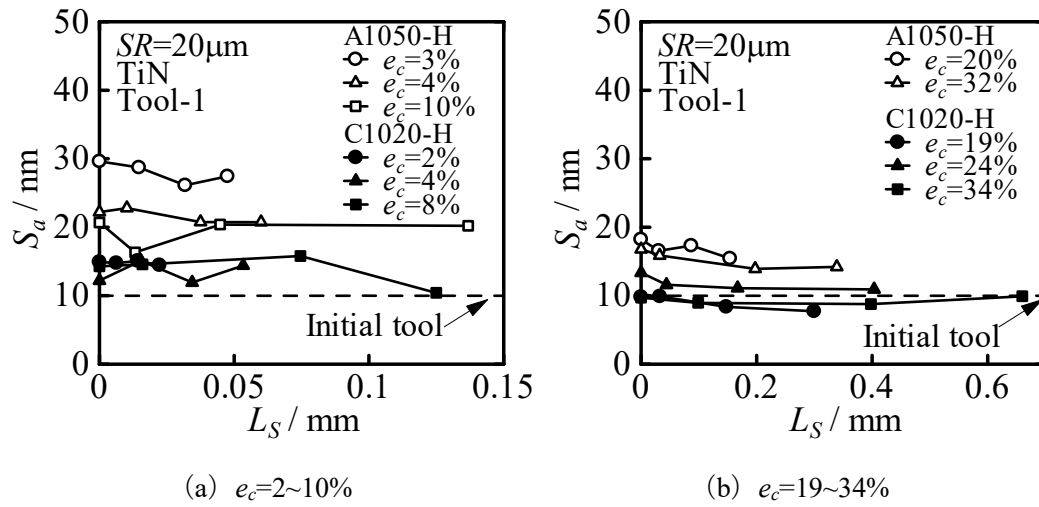


Fig.3.85 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-1, H 材)

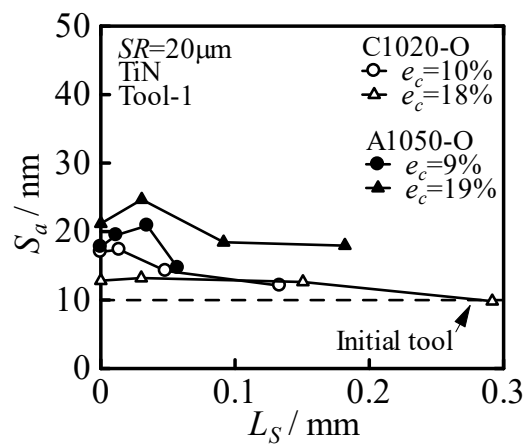


Fig.3.86 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-1, O 材)

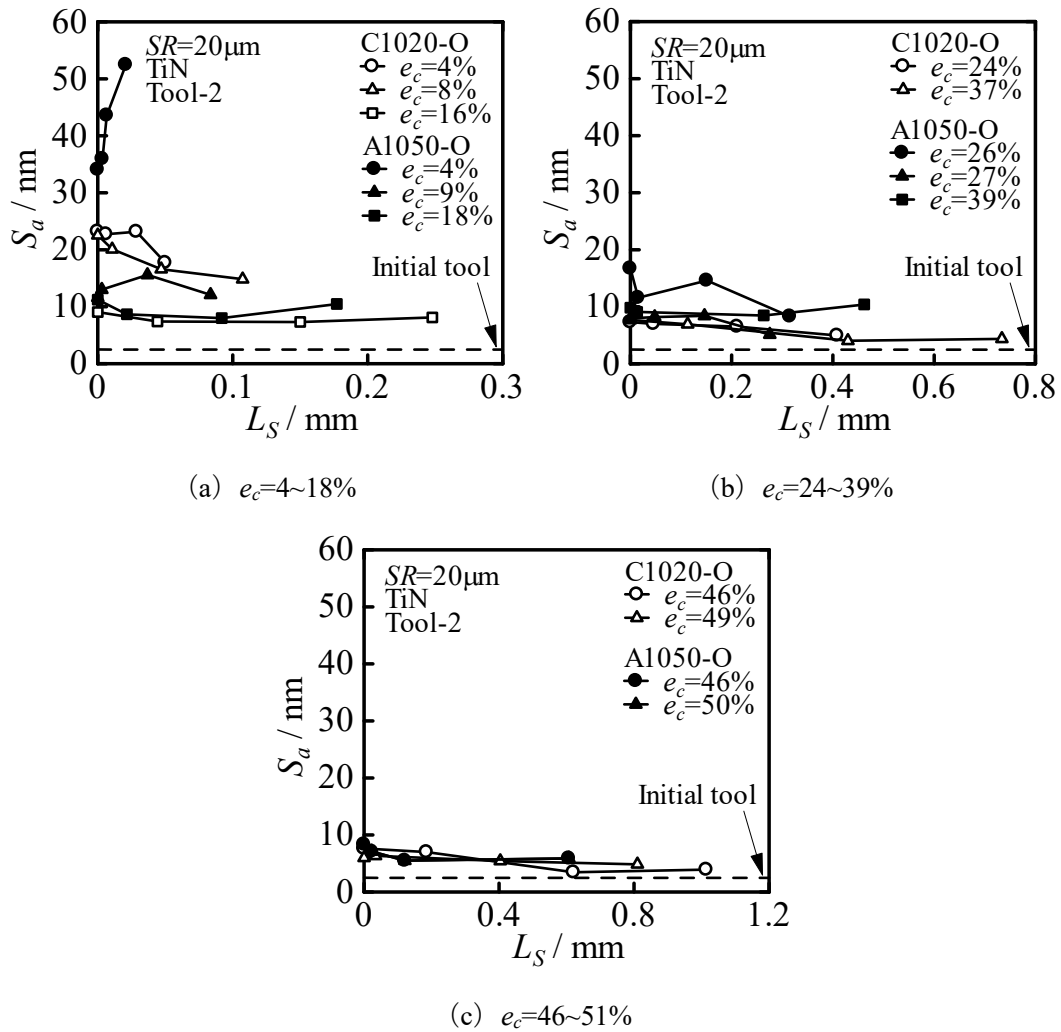


Fig.3.87 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (TiN, Tool-2, O 材)

3.7 工具表面膜種の影響

工具表面膜種の影響を調べるため、今回行った A1050-H における Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) TiN コーティングの圧縮試験結果と過去に行った DLC (Diamond Like Carbon) コーティングの圧縮試験結果⁽²¹⁾の比較、今回行った C1020-O における Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) および Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) TiN コーティングの圧縮試験結果と過去に行った DLC コーティングの圧縮試験結果^{(23), (24)}の比較を行う。

過去に工具への DLC コーティングを依頼した日本アイ・ティ・エフ株式会社のジェニア スコート DLC シリーズ HA の仕様を Table 3.3 に示す。

Table 3.3 DLC コーティングの仕様

DLC 構造	硬度 (Hv)	膜厚 (nm)	酸化温度	処理温度	摩擦係数	面粗度 R_z (μm)
ta-C	>3000	100	500°C	150~200°C	0.15~0.2	1.0 (ラップ後 0.2)

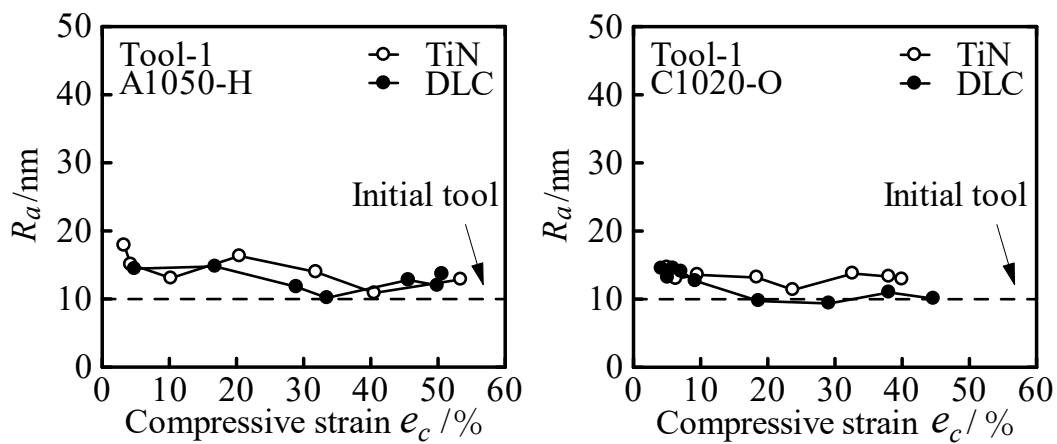
色調	特徴	適用基材	用途
透明干渉色	水素フリーでダイヤモンドに次ぐ硬さを有し油中での摩擦低減に効果	超硬一般鋼	自動車部品 油中摺動部品 軟質金属 (アルミ, 銅, スズ, 亜鉛, ニッケル, 銀等) 加工用工具・金型

3.7.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.88 に各条件における触針式表面粗さ計より得られた算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの条件においても圧縮率によらず TiN と DLC の間に大きな差は見られない.

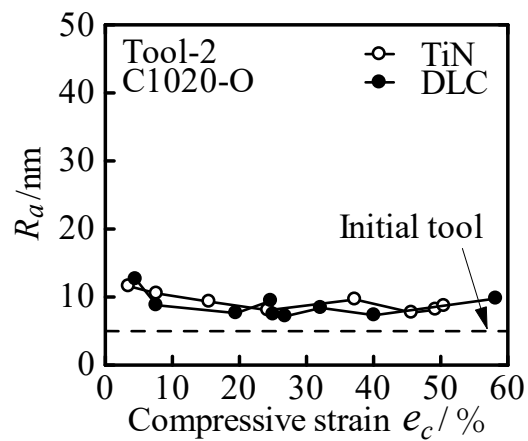
Fig.3.89 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す. Tool-1, A1050-H と Tool-1, C1020-O では低圧縮率において TiN の方が平均面圧が大きく, 高圧縮率では大きな差は見られない. Tool-2, C1020-O では, いずれの圧縮率でも大きな差は見られない. これより, 摩擦係数がより大きい TiN の方が平均面圧が大きくなる傾向があると考えられる. また, C1020-O の Tool-1 と Tool-2 に違いがあることから, C1020-O では工具表面粗さが TiN と DLC の潤滑状態に影響を与えていると考えられる.

Fig.3.90 に荷重 P と変位 S_r の関係を示す. いずれの条件においても TiN の方が荷重が大きい傾向が見られる. これは TiN の方が摩擦係数が大きいためだと考えられる.



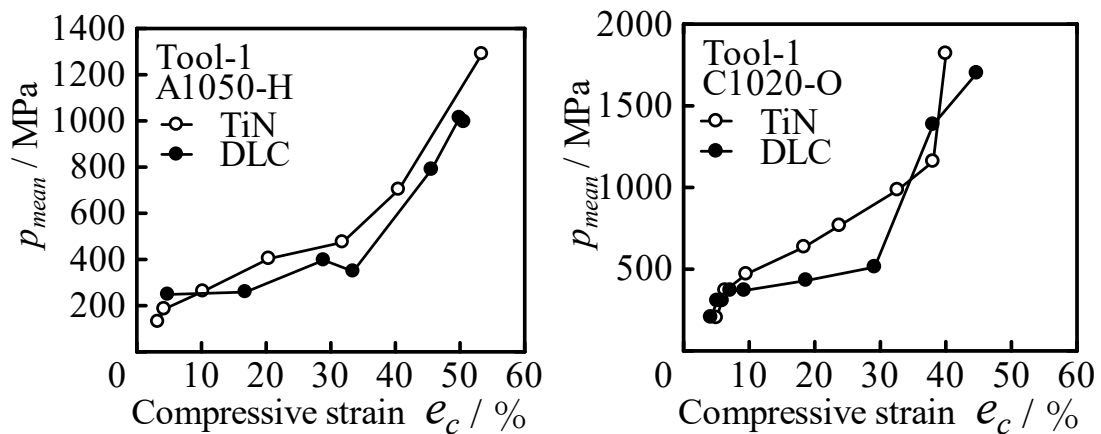
(a) Tool-1, A1050-H

(b) Tool-1, C1020-O



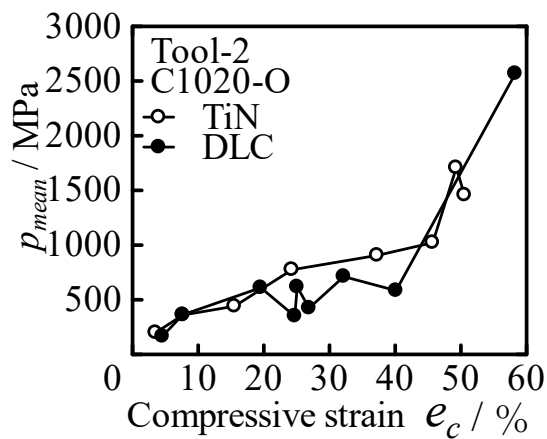
(c) Tool-2, C1020-O

Fig.3.88 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係



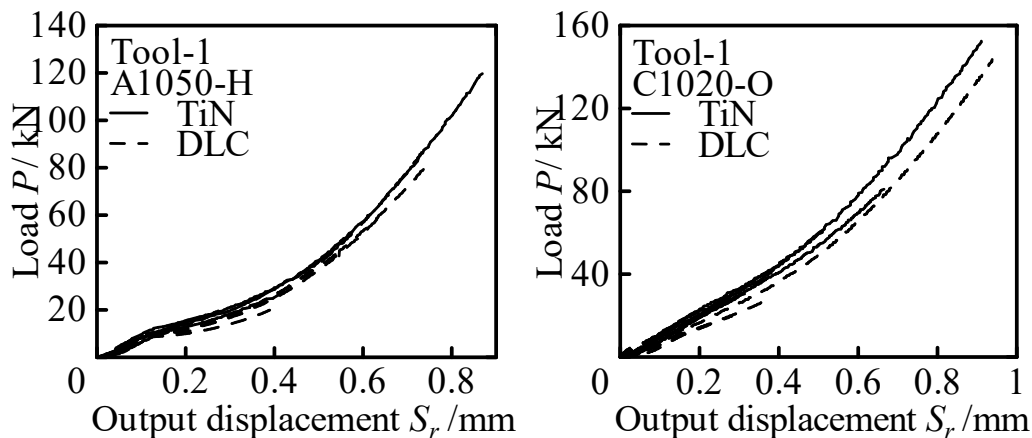
(a) Tool-1, A1050-H

(b) Tool-1, C1020-O



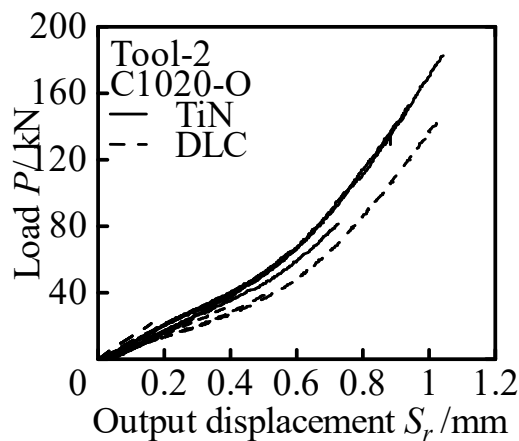
(c) Tool-2, C1020-O

Fig.3.89 平均面圧 P_{mean} と圧縮率 e_c の関係



(a) Tool-1, A1050-H

(b) Tool-1, C1020-O



(c) Tool-2, C1020-O

Fig.3.90 荷重 P と変位 S_r の関係

3.7.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価

Fig.3.91 に Tool-1, A1050-H の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 低圧縮率において中心部では大きな違いは見られないが, 外周部では DLC の方が S_a が小さくなっている. 高圧縮率では測定箇所によらず大きな差は見られない. これは低圧縮率では面圧による転写効果の影響が大きく, 硬度の高い DLC の方が転写効果が大きくなり, 平滑化が進んだものと考えられる.

Fig.3.92 に Tool-1, C1020-O の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 中心部において低圧縮率では大きな差は見られないが, 高圧縮率では DLC の方が S_a が小さくなっている. 外周部では圧縮率によらず大きな差は見られない. これは高圧縮率において, 硬度の高い DLC の方が TiN よりも面圧による転写効果が大きいのではないかと考えられる.

Fig.3.93 に Tool-2, C1020-O の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 中心部において低圧縮率では DLC の方が S_a が小さく, 高圧縮率では大きな差は見られない. 外周部では圧縮率によらず大きな差は見られない. これは低圧縮率において, 硬度の高い DLC の方が TiN よりも面圧による転写効果が大きいのではないかと考えられる.

Fig.3.94 に Tool-1, A1050-H の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. 加工初期では DLC が $r=3\text{mm}$ 地点で急激に S_a が小さくなっている. その後は TiN, DLC ともに測定箇所による S_a の差はほぼ見られない.

Fig.3.95 に Tool-1, C1020-O の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. 低圧縮率において DLC の方が TiN と比べ測定箇所による S_a の変化が大きい. 高圧縮率において中心部では DLC の方が S_a が小さいが, 外周部では大きな差は見られない.

Fig.3.96 に Tool-2, C1020-O の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. いずれの圧縮率でも測定箇所による違いは見られない.

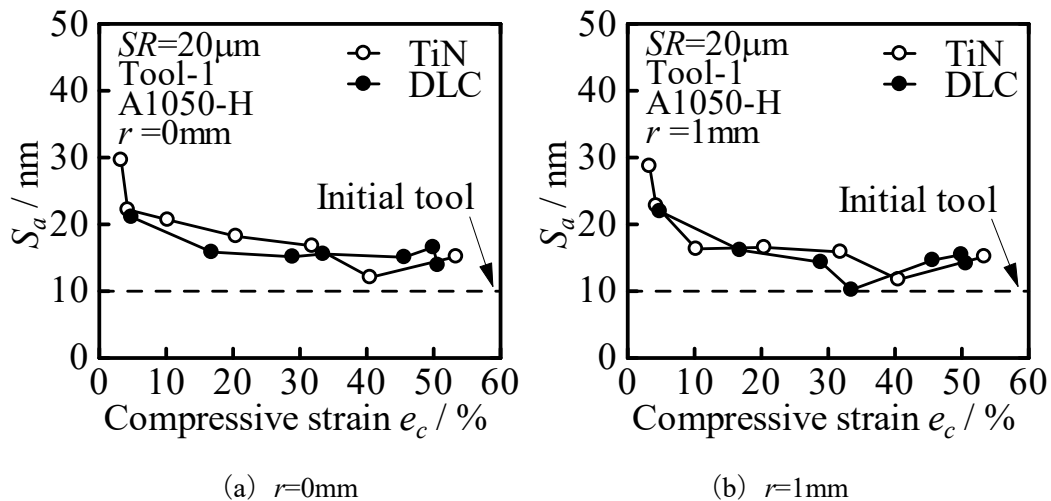
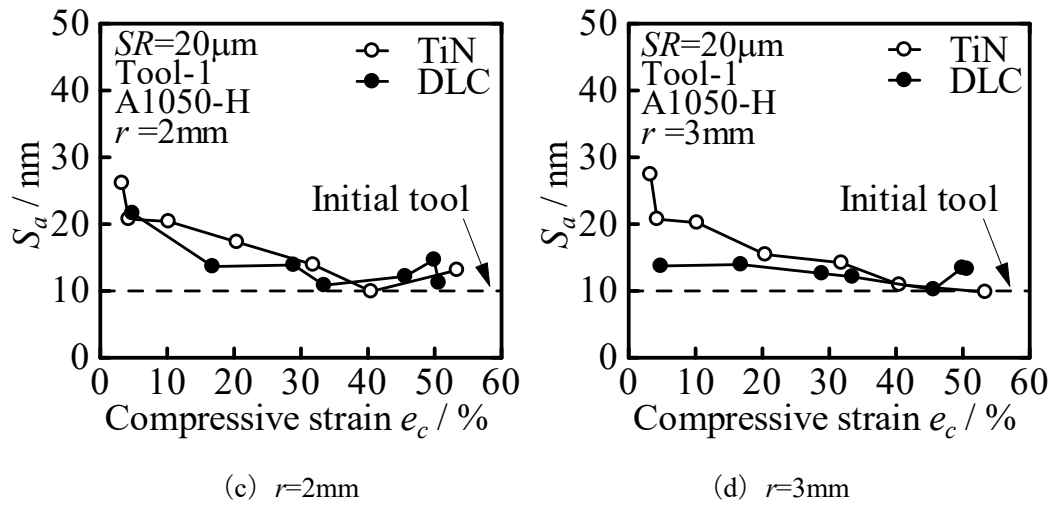
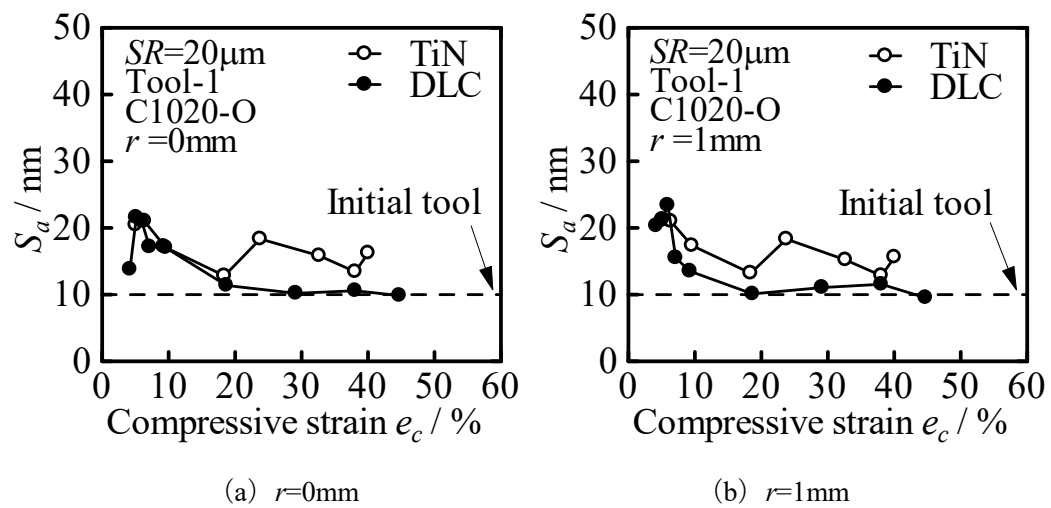
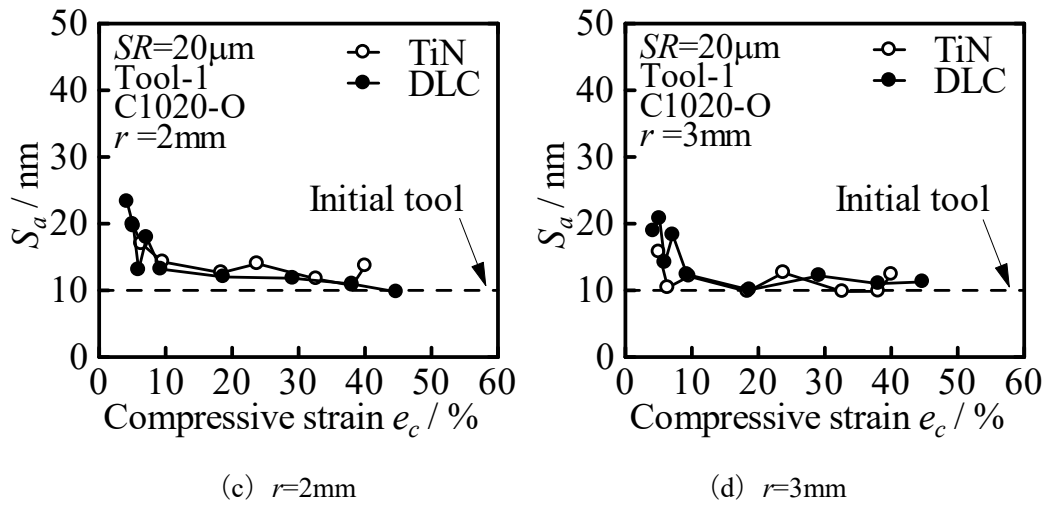
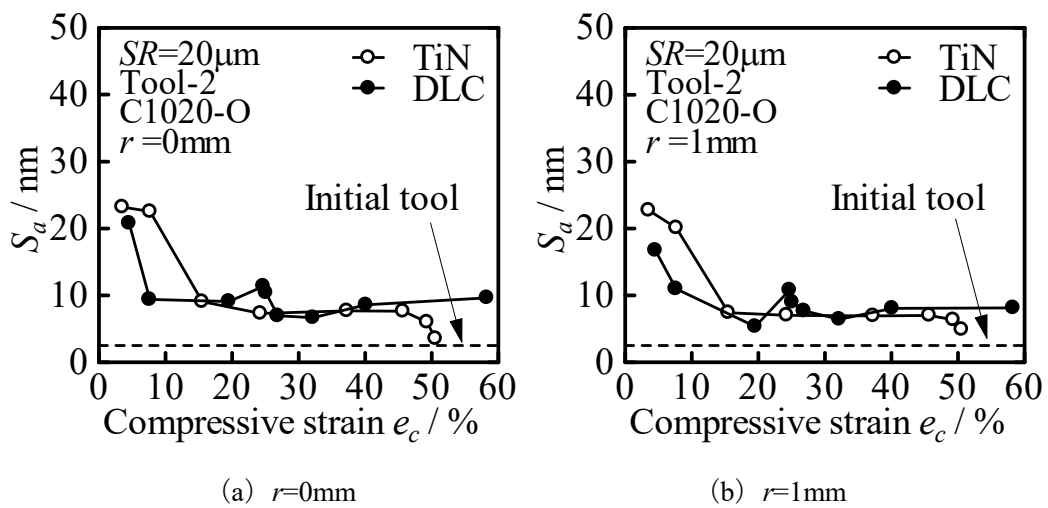
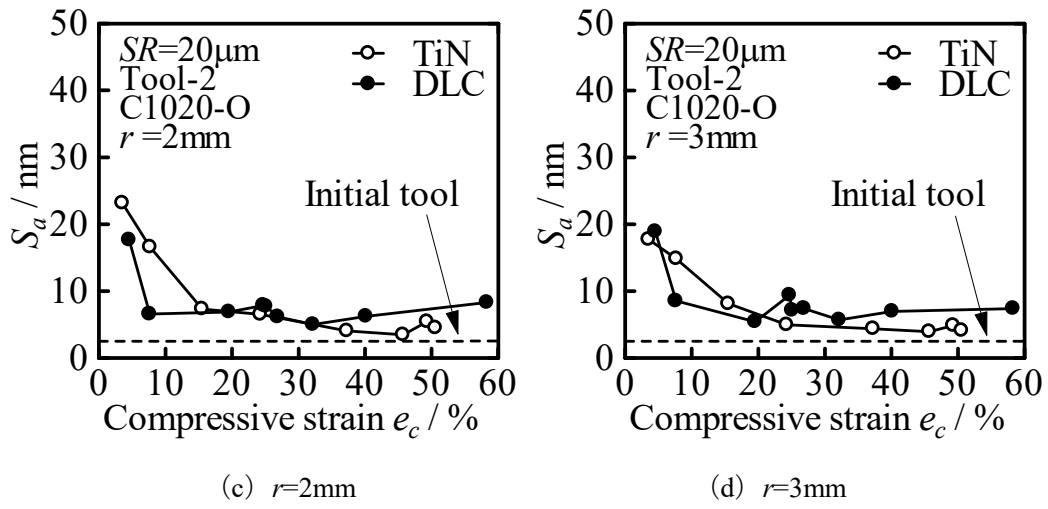
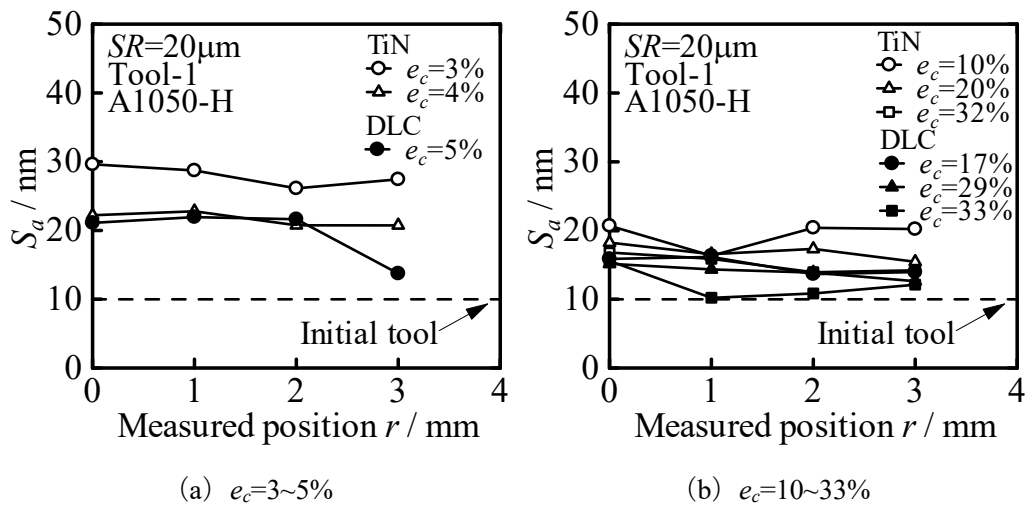
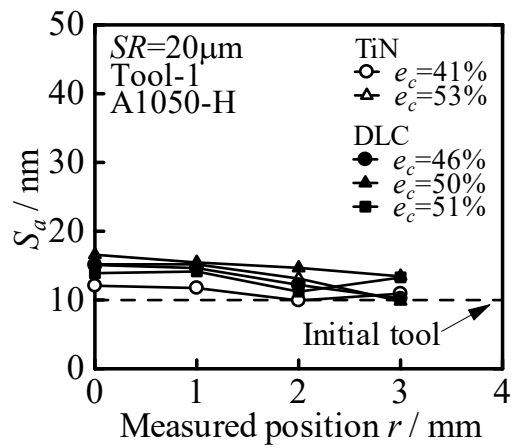
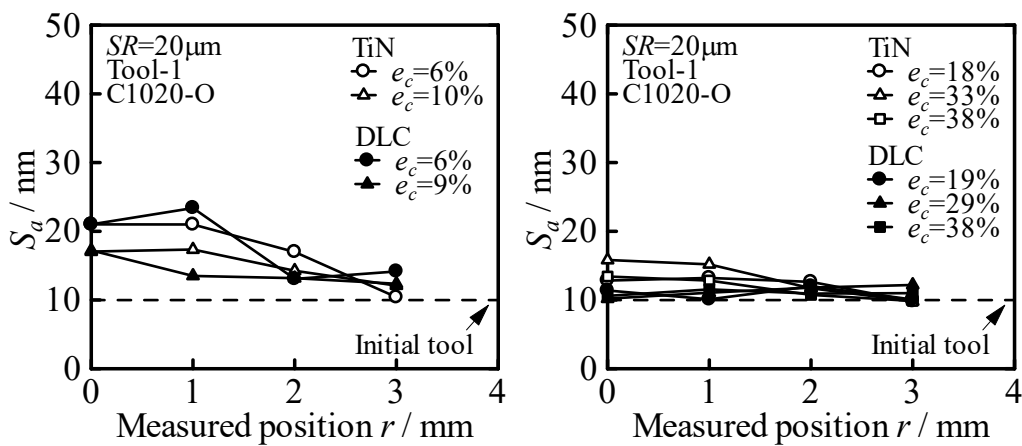


Fig.3.91 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H)

Fig.3.91 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H)Fig.3.92 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, C1020-O)

Fig.3.92 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, C1020-O)Fig.3.93 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, C1020-O)

Fig.3.93 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, C1020-O)Fig.3.94 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (Tool-1, A1050-H)

(c) $e_c=41\sim 53\%$ Fig.3.94 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (Tool-1, A1050-H)(a) $e_c=6\sim 10\%$ (b) $e_c=18\sim 38\%$ Fig.3.95 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (Tool-1, C1020-O)

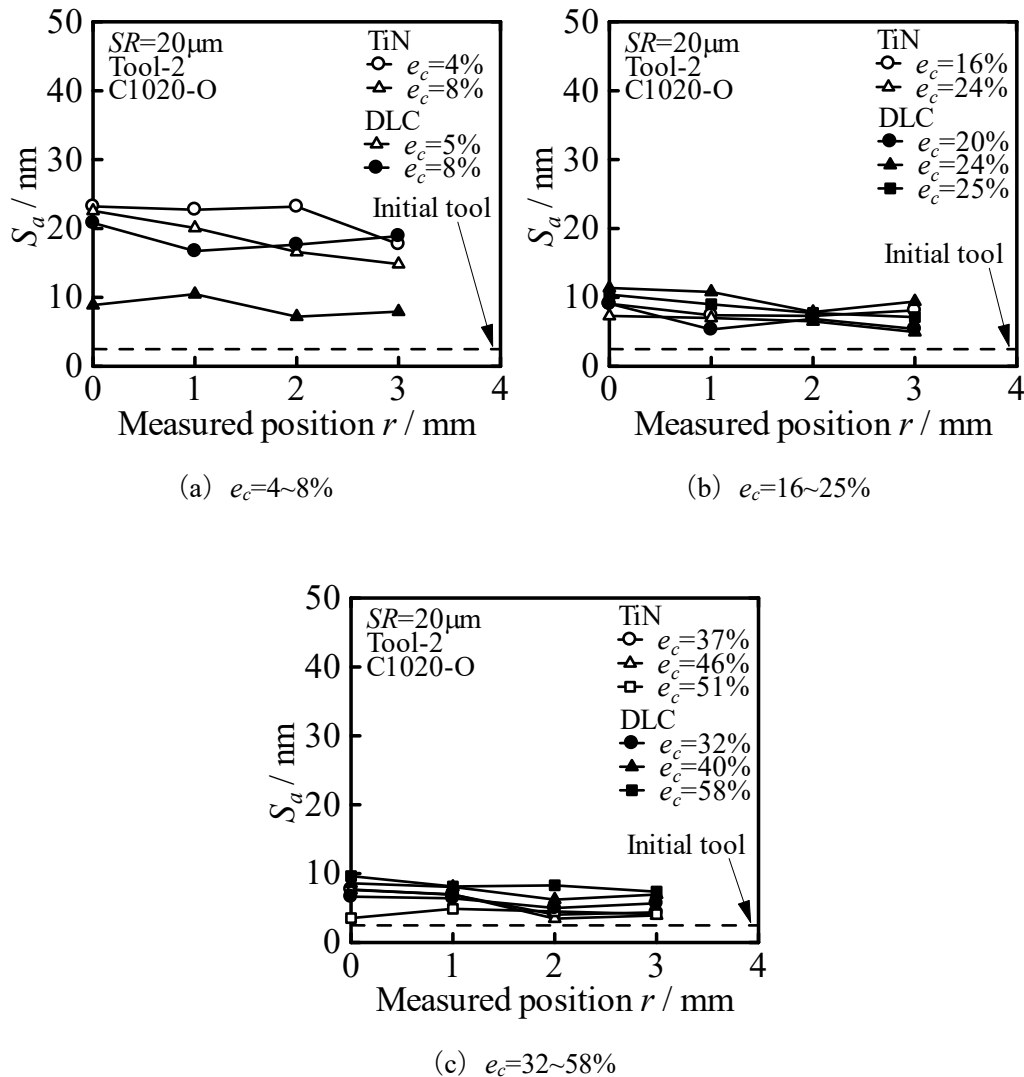


Fig.3.96 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (Tool-2, C1020-O)

3.7.3 有限要素法(FEM)解析結果

Fig.3.97 に Tool-1, A1050-H の FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。TiN, DLC とともにすべり量が大きくなると面圧が小さくなり、圧縮率 20%程度や、圧縮率 32%程度の圧縮率で比べると DLC の方がすべり量が多いことがわかる。

Fig.3.98 に Tool-1, C1020-O の FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。TiN, DLC とでは大きな違いは見られず、すべり量が大きくなると面圧が小さくなる。

Fig.3.99 に Tool-2, C1020-O の FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。TiN, DLC とでは大きな違いは見られず、すべり量が大きくなると面圧が小さくなる。

Fig.3.100 に Tool-1, A1050-H の算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。低圧

縮率ではすべり量が大きくなるにつれて TiN と DLC の S_a の差が大きくなっていき、高圧縮率ではすべり量による S_a の差に大きな変化がないことがわかる。

Fig.3.101 に Tool-1, C1020-O の算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。低圧縮率では、はっきりとした傾向が見られないが、高圧縮率では、すべり量が小さいとき DLC の方が S_a が小さいが、すべり量が大きくなると同程度の S_a となることがわかる。

Fig.3.102 に Tool-2, C1020-O の算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。いずれの圧縮率においてもすべり量による S_a の変化に大きな差は見られない。

以上より, Tool-1, A1050-H では, 低圧縮率の中心部において大きな違いは見られないが, 外周部では DLC の方が平滑化が進む。高圧縮率では測定箇所によらず大きな差は見られない。これは低圧縮率では面圧による転写効果の影響が大きく, 硬度の高い DLC の方が転写効果が大きくなり, 平滑化が進んだものと考えられる。

Tool-1, C1020-O では, 中心部の低圧縮率において大きな差は見られないが, 高圧縮率では DLC の方が平滑化が進む。外周部では圧縮率によらず大きな差は見られない。これは高圧縮率において, 硬度の高い DLC の方が TiN よりも面圧による転写効果が大きいのではないかと考えられる。

Tool-2, C1020-O では, 中心部の低圧縮率において DLC の方が平滑化が進み, 高圧縮率では大きな差は見られない。外周部では圧縮率によらず大きな差は見られない。これは低圧縮率において, 硬度の高い DLC の方が TiN よりも面圧による転写効果が大きいのではないかと考えられる。

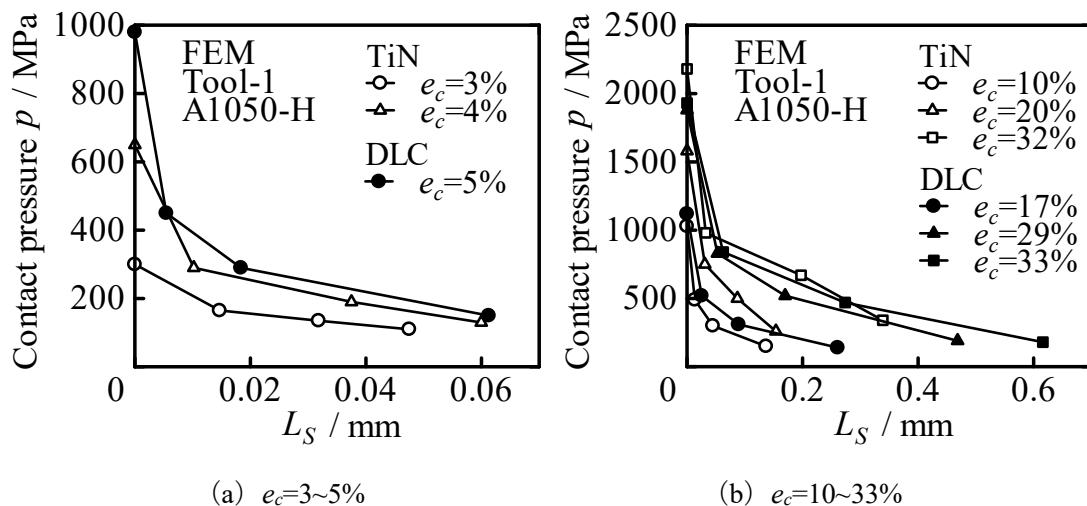
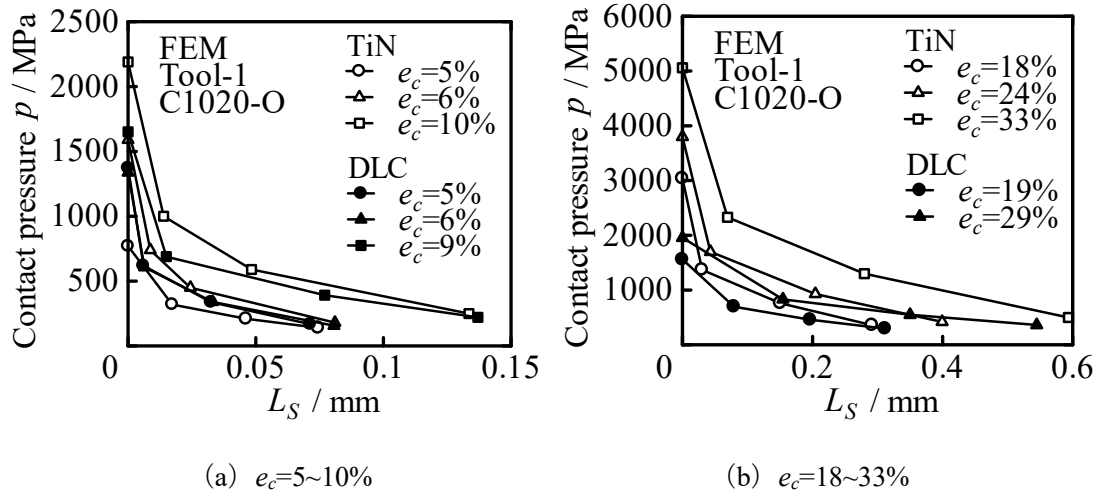
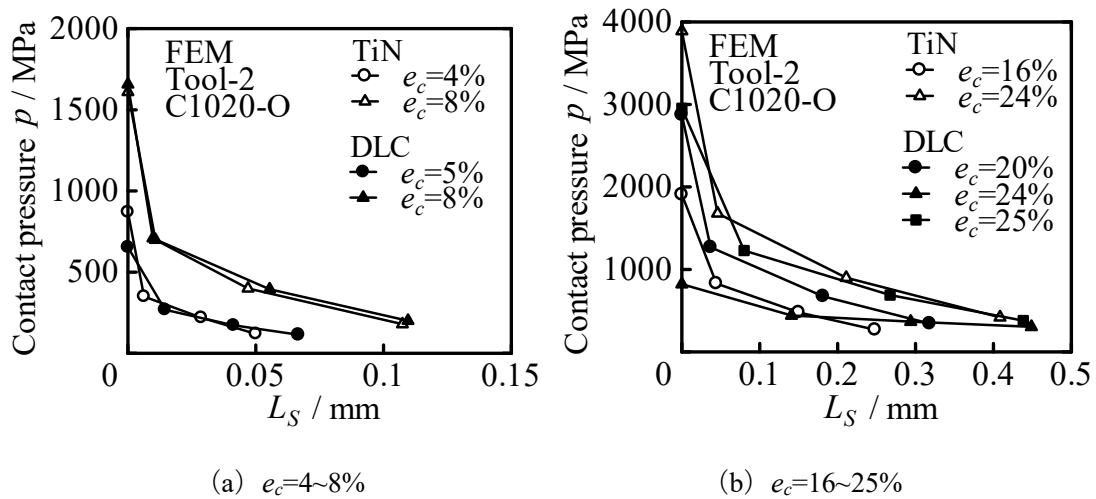
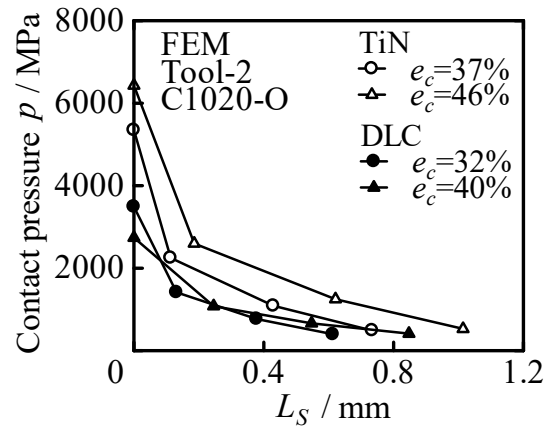
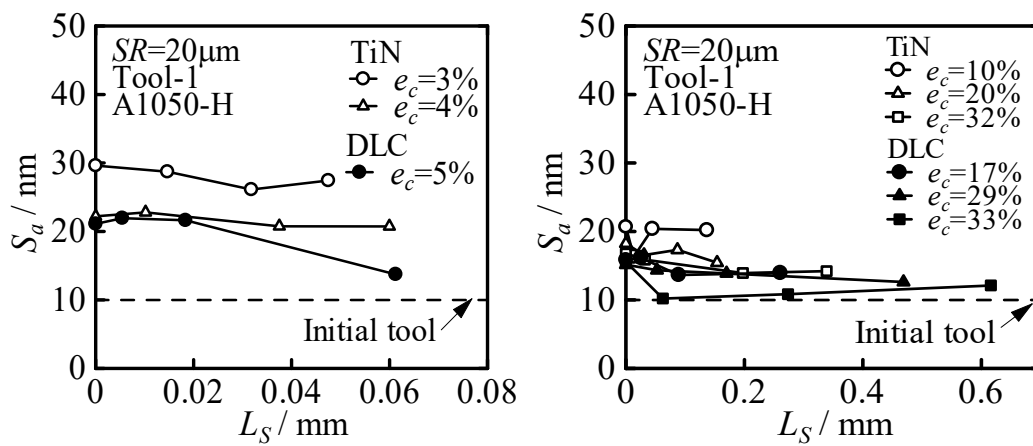
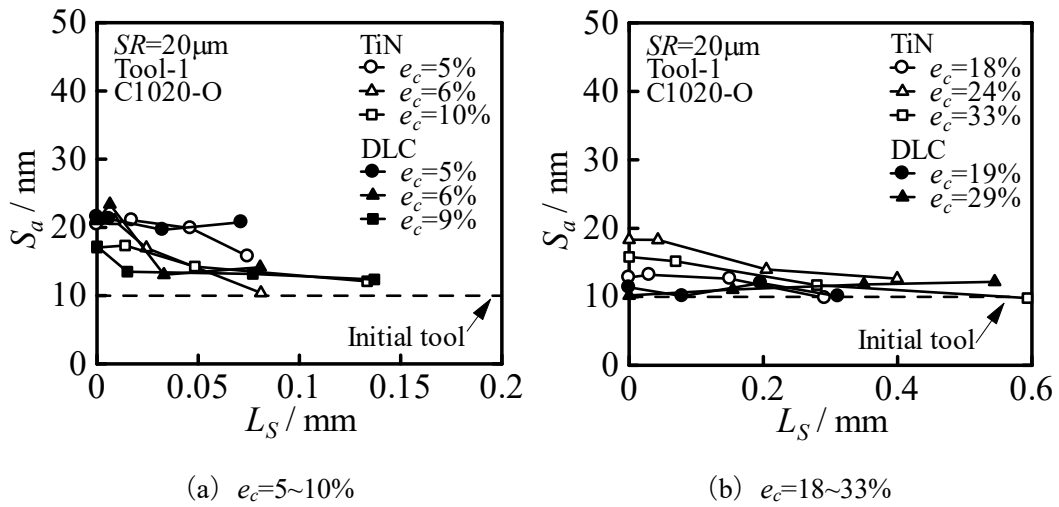
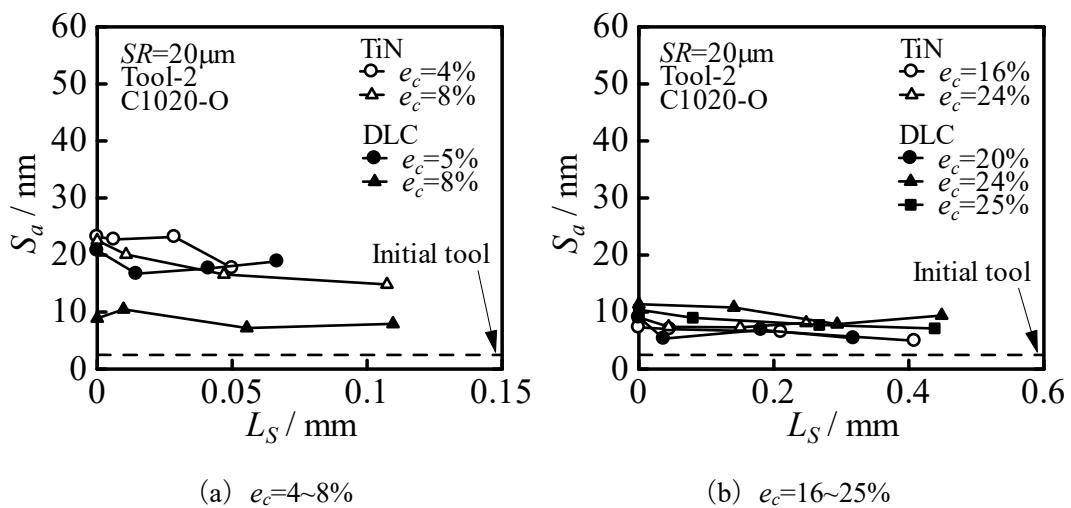
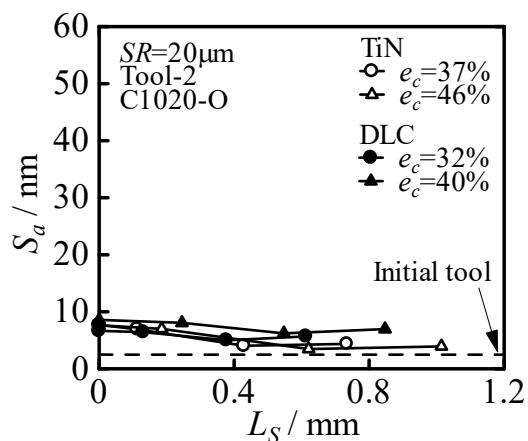


Fig.3.97 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (Tool-1, A1050-H)

Fig.3.98 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (Tool-1, C1020-O)Fig.3.99 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (Tool-2, C1020-O)

(c) $e_c=32\sim 46\%$ Fig.3.99 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (Tool-2, C1020-O)(a) $e_c=3\sim 5\%$ (b) $e_c=10\sim 33\%$ Fig.3.100 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (Tool-1, A1050-H)

Fig.3.101 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (Tool-1, C1020-O)Fig.3.102 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (Tool-2, C1020-O)

(c) $e_c=32\sim 46\%$ Fig.3.102 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係 (Tool-2, C1020-O)

以上、本章の結果より、加工硬化した材料の方が、低圧縮率のとき転写効果によって平滑化がより進む傾向があることがわかった。工具表面粗さが小さいと平滑化がより進むことがわかった。また、工具表面粗さ $R_a=10\text{nm}$ では初期工具と同程度まで平滑化が進むが、 $R_a=5\text{nm}$ では初期工具程度までは平滑化が進まないことがわかった。変形抵抗の大きい材料の方が平滑化が進む傾向があることがわかった。TiN よりも DLC の方が転写効果によって平滑化がより進む傾向があることがわかった。

第4章 加工品表面のフラクタル解析

前章までは、表面粗さ計・AFMによる表面の観察、FEM解析による変形シミュレーションを行い、試験片表面を粗さの観点から評価した。本章では、試験片表面の凹凸形状を複雑さという観点から評価することで超平滑面の創成挙動を検討するために、試験片表面のフラクタル解析を行った。

4.1 フラクタルの説明

フラクタル (fractal) とは、1975年にフランスの数学者 Mandelbrot⁽³⁵⁾によって提唱された幾何学の概念であり、ラテン語の *fractus* が語源となっている。これは特徴的な長さを持たないような図形や構造、現象などの総称のことである。特徴的な長さを持たない図形とは、言い換えれば近似が難しい図形のことである。例えば車を直方体で近似できるようにフラクタル図形を何か単純な図形で近似することは出来ない。つまりここで言う特徴的な長さとは、その対象に付随する代表的な長さを指す。フラクタルの概念の基本は、「きわめて複雑な図形であってもそれはごく単純な図形の繰り返しによって出来上がっているとみなす」ことにある。

フラクタルには、自己相似フラクタルと自己アフィンフラクタルの2つの種類がある。自己相似フラクタルとは、図形の一部を等方的に拡大すると全体と全く同じ形状になる厳密な自己相似フラクタルと、ほぼ同じ形状になる統計的な自己相似フラクタルのことを指す。厳密な自己相似フラクタルの例としては、Fig.4.1 に示すコッホ曲線、Fig.4.2 のシルピンスキーのギャスケット、Fig.4.3 のカントール集合などが挙げられる。また、統計的な自己相似フラクタルの例としては、山や谷などの地表や海岸線等の地形、河川の蛇行や分岐の様子、肺や血管の構造、植物の構造が挙げられる⁽³⁶⁾。

これに対して自己アフィンフラクタルとは、図形の一部を等方的に拡大するのではなく異方的に拡大したとき全体と全く同じ形状になる厳密な自己アフィンフラクタルと、ほぼ同じ形状になるという統計的な自己アフィンフラクタルのことを指す。自己アフィンフラクタルの例としては、金属表面プロフィールや Mandelbrot と Van Ness のフラクショナル・ブラウン運動⁽³⁷⁾が挙げられる。

このようにフラクタルは、拡大しても元の形状と同じように複雑であるために接線、接平面の引きようがなく、微分を定義できないという特徴を持つ。

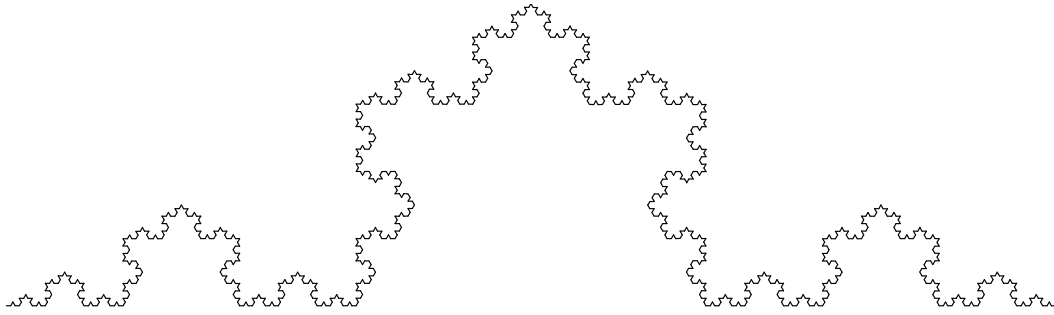


Fig.4.1 コッホ曲線

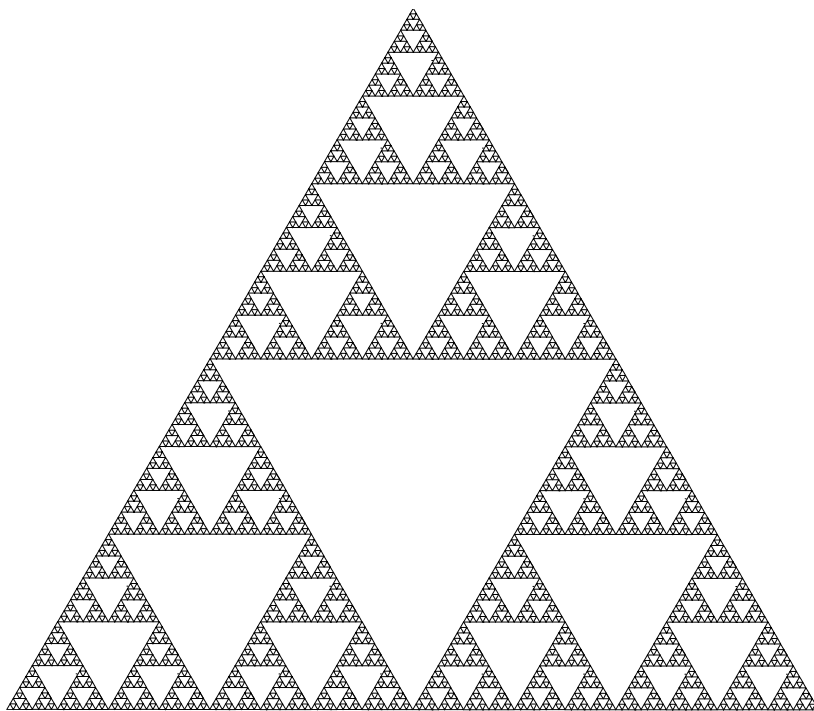


Fig.4.2 シルピンスキーのギャスケット



Fig.4.3 カントール集合

4.2 フラクタル次元の決定法

通常、フラクタル特性を定量化するのにフラクタル次元が用いられる。その物理的意味は扱う対象によって異なるので一般的な説明は困難であるが、直感的に説明すると「フラクタル次元が大きいとは、曲線（輪郭を含む）や曲面の形状がより複雑であること」⁽³⁸⁾ということであり、曲線、曲面の複雑性を示す指標である。

ユークリッド幾何学において、点は0次元、直線は1次元、平面は2次元、空間は3次元、そして相対論では空間は4次元となる⁽³⁶⁾。これらの次元は全て整数であり、その数字は独立に選べる変数の数と一致する。しかし、フラクタル次元は非整数の次元を持つという特徴を持つ。その整数部はどの次元の空間内にあるのかを示し、小数部は図形の複雑さを示す。

これまでにフラクタル次元の測定法として各種方法が試されてきたが、確立されたものがない上、得られたフラクタル次元相互の理論的關係も明らかではない。そのため本研究では、対象表面の横断面形状を評価するために零点集合法を、縦断面形状を評価するためにパワースペクトル法を用いてフラクタル次元を求めた。

4.2.1 零点集合次元

零点集合とは、曲面 $V(x, y)$ に対して $V(x, y) - V_0 = 0$ となるすべての点の集合、すなわちある物体の表面を基準面で切ったときの切り口の輪郭を指す。この方法は「表面が自己アフィンであっても面内等方性であれば得られる零点集合要素は自己相似となり、そのフラクタル次元は表面の次元より1だけ小さくなる」という原理に基づいている。ここで、零点集合要素である周囲長と面積を測定すればフラクタル次元を求めることができる。Fig.4.4 に零点集合法の原理を模式図で示す。図に示す零点集合要素から零点集合次元を求めるためには次のような測度の関係を用いる。

一般に、物体の測度には次の関係が成立する。ここでいう測度とは1次元測度が長さ、2次元測度が面積、3次元測度が体積というように長さや面積を一般化した概念である。

$$L \propto A^{1/2} \propto V^{1/3} \quad (4.1)$$

ここで、 L は長さ、 A は面積、 V は体積である。 D 次元測度を持つフラクタル物理量を X とするとき式(4.1)は次式のように一般化できる⁽³⁶⁾。

$$L \propto A^{1/2} \propto V^{1/3} \propto X^{1/D} \quad (4.2)$$

零点集合要素の面積を A 、周囲長を X として、両対数グラフに表すと直線の勾配 α が得られる。したがって X は式(4.2)より次式で表すことができる。

$$X \propto A^{D/2} \quad (4.3)$$

したがって、 $D=2\alpha$ がフラクタル次元となる。以降、零点集合法のフラクタル次元を D_z で表すことにする。

なお零点集合法は、表面プロフィールがランダム性、一様性、等方性を持つときに有効で

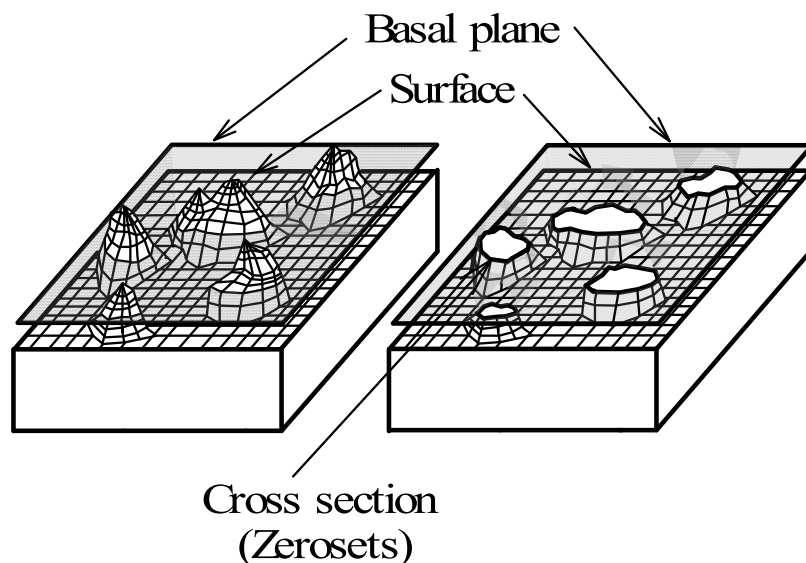


Fig.4.4 零点集合法の概要

あるとの指摘があり、金属表面は多少なりとも面内異方性を持つと考えられるが、本研究では面内等方性を仮定することにした。

4.2.2 パワースペクトル次元

パワースペクトル次元とは、表面断面曲線に対して FFT 解析を行い、得られるパワースペクトル密度 S_p と波長 λ との関係から得られる。まず、フーリエ変換⁽³⁷⁾の説明から行う。

与えられた信号の中に、どのような周波数の成分が含まれているかを調べるのが周波数分析である。精度の高い周波数分析を行うにはコンピュータによるデジタル処理が必要となり、コンピュータを使った周波数分析の基本となる考え方がフーリエ変換である。

アナログ非周期信号 $x(t)$ に対するフーリエ変換は、

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.4)$$

で定義される。デジタル信号（離散信号）の周波数分析を扱う場合には、フーリエ変換も離散値に対して定義されなければならない。

離散信号 $x_n = x(n)$ $\{n = 0, 1, 2, \dots, n\}$ の離散フーリエ変換（DFT）は、

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi nk/N} \quad (4.5)$$

で定義される。 X_k は複素フーリエ係数、 n はデータ番号、 N はデータ数である。式(4.5)を分解して、正弦波、余弦波成分で表すと、

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos(2\pi nk / N) \quad (4.6)$$

$$B_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \sin(2\pi nk / N) \quad (4.7)$$

とおくと

$$X_k = A_k - jB_k$$

と書け、 A_k 、 B_k と X_k の関係は、

$$|X_k|^2 = A_k^2 + B_k^2 \quad (4.8)$$

となる。 X_k の2乗値がパワースペクトルである。

式(4.4)を直接計算するとデータ数 N に対し N^2 回の複素計算を要し、コンピュータの計算時間がほぼ乗除算の回数に比例することから、妥当な精度で周波数分析結果を得るためには、かなりの時間がかかってしまう。そこで、式(4.5)を実際に計算するときには、高速フーリエ変換(FFT)を用いる。この方法は、1965年にCooleyとTukeyによって発表された。高速フーリエ変換とは回転子と呼ばれるものの性質を使って複素乗算・加算の計算回数を減らし、離散フーリエ変換を高速に行う手法である。

次に、自己アフィンフラクタル曲線 $V_H(t)$ のスペクトル密度とフラクタル次元 D_{PS} の関係を、「フラクタルイメージ」⁽³⁷⁾より引用して以下に説明する。

自己アフィンフラクタルの $V_H(t)$ はfBm(Fractional Brownian Motion)関数であり、 t と V_H を各々異なる比率 $H(0 < H < 1)$ で拡大したときに、その形状を統計的に繰り返す。つまり、 t を r 倍すると($t \rightarrow rt$)、 V_H は r^H 倍になる($V_H \rightarrow r^H V_H$)性質を持つ。

ここで、 $X(t)$ をfBm関数とすると、適当にスケーリングされた関数

$$Y(t) = \frac{1}{r^H} X(rt) \quad (4.9)$$

は、 $r > 0$ を満たす r について X と統計的に同一の性質を持つ。よってスペクトル密度も同じはずである。

$$Y(t, T) = \begin{cases} Y(t) = \frac{1}{r^H} X(rt) & , 0 < t < T \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (4.10)$$

とし、以下のような表記法を用いる。

$F_X(t, T)$ 、 $F_Y(t, T)$ は各々 $X(t, T)$ 、 $Y(t, T)$ のフーリエ変換、 $S_X(t, T)$ 、 $S_Y(t, T)$ は $X(t, T)$ 、 $Y(t, T)$ のスペクトル密度であり、 F_Y は次式のように計算される。

$$F_Y(f, T) = \int_0^T Y(t) e^{-2\pi jft} dt = \frac{1}{r^H} \int_0^{rT} X(s) e^{-2\pi jf \frac{s}{r}} \frac{ds}{r} \quad (4.11)$$

この2番目の積分式において s/r を t で、 ds/r を dt によって、それぞれ置き換えると明らかに

$$F_Y(f, T) = \frac{1}{r^{H+1}} F_X\left(\frac{f}{r}, rT\right) \quad (4.12)$$

である。よって、 $Y(t, T)$ のスペクトル密度は

$$S_Y(f, T) = \frac{1}{r^{2H+1}} \frac{1}{rT} \left| F_X\left(\frac{f}{r}, rT\right) \right|^2 \quad (4.13)$$

となり、 $T \rightarrow \infty$ の極限を考えることは $rT \rightarrow \infty$ に等価なので、以下の結果を得る。

$$S_Y(f, T) = \frac{1}{r^{2H+1}} S_X\left(\frac{f}{r}\right) \quad (4.14)$$

Y は X に適当なスケーリングを施したもののなので、パワースペクトル密度は一致しなければならない。すなわち、

$$S_X(f, T) = \frac{1}{r^{2H+1}} S_X\left(\frac{f}{r}\right) \quad (4.15)$$

である。形式的に $f=1$ とし、 $1/r$ を再度 f で置き換えると、

$$S_X(f) \propto \frac{1}{f^{2H+1}} = \frac{1}{f^\beta} \quad (4.16)$$

となり、式(4.16)を一般化し、スペクトル密度関数を $S_P(f)$ とすると

$$S_P(f) \propto \frac{1}{f^\beta} \quad (4.17)$$

となる。ここで信号波の進む速度が一定 ($f\lambda = \text{const.}$) ならば

$$S_P(\lambda) \propto \lambda^\beta \quad (4.18)$$

のべき乗の形で表される。この $S_P(f)$ を波長 λ との両対数グラフ上にプロットすると勾配 β の直線状になる。この勾配 β と $f(t)$ の持つフラクタル次元 D_{PS} には次の関係が与えられる。

$$D_{PS} = 2, \quad 0 \leq \beta < 1$$

$$D_{PS} = E + \frac{3-\beta}{2} \quad 1 \leq \beta \leq 3 \quad (4.19)$$

$$D_{PS} = 1, \quad 3 < \beta$$

ただし、 E は変数の自由度を表し、本研究のような断面曲線の場合は1である。

4.3 AFM システムにおけるフラクタル次元の測定法

4.3.1 零点集合次元 D_z の測定法

フラクタル解析を行うための試料表面画像は、AFM を用いて走査範囲 SR が $20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$ ($SR=20\mu\text{m}$) の条件で求め、AFM に備えられているソフトウェアによって傾き補正を行った。補正方法は「X 方向の平均値」と「面フィット」の 2 つであり、それぞれ処理ボタンを押すことによってソフトウェアが自動的に行う。画像情報は必要に応じてノイズライン除去を行い、画像処理ソフトウェア WinROOF (MITANI CORPORATION 製) に取り込めるように TIFF 形式に変換した (Fig.4.5 (a))。この TIFF 形式画像を WinROOF で開き、グレー画像化する (Fig.4.5 (b))。そしてキャリブレーションを行い 1 画素の長さを設定する。キャリブレーションの値は、 $SR=20\mu\text{m}$ の場合 512×512 画素で表示されているので 1 画素の長さは 39.1nm である。そして、その画像を 2 値化し (Fig.4.5 (c)) 零点集合要素である面積 A_z と周囲長 L_z を得た。ここで零点集合要素が境界線に接しているデータと、面積が 10 画素以下のデータは削除した。

零点集合カット面をつくるには、色調が 256 階調で表されているグレー画像をしきい値で 2 値化しなくてはならない。この 2 値化のために AFM 画像の最大高さからのカット量を相対カット量として表すことにした。相対カット量 δ は次式で表される。

$$\delta = \frac{256 - \text{しきい値}}{256} \times 100 \% \quad (4.20)$$

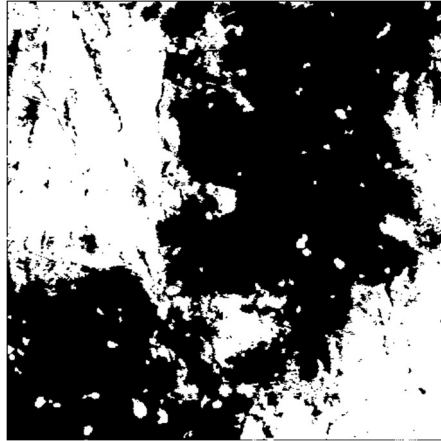
本研究では画像の 2 値化の相対カット量を 18%, 34%, 49%, 65%, 80% と固定し、変化させる。

次に、得られた零点集合要素データを表計算ソフト Excel (Microsoft 製) に取込み、Fig.4.6 に示すように縦軸を周囲長 L_z 、横軸を面積 A_z として両対数グラフを作成した。両者の関係に対してべき乗近似を適用することで近似直線を求め、直線の勾配 α から零点集合次元 $D_z=2\alpha$ を得た。ここで、3 つの AFM 画像から得られる零点集合要素データを 1 つのグラフにプロットすることで信頼性を高めた。

Fig.4.7 に相対カット量 δ を 18%, 34%, 49%, 65%, 80% で求めた両対数グラフと $\delta=34\%$ だけ、 $\delta=49\%$ だけの両対数グラフを示す。相対カット量による大きな違いはない。

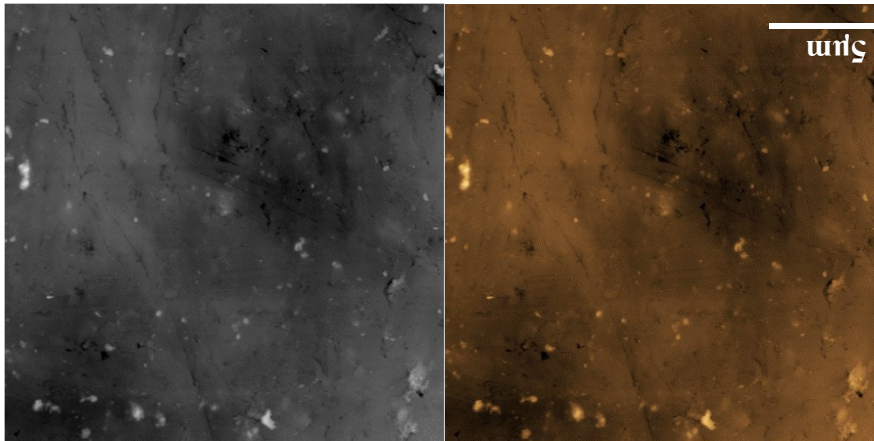
Fig.4.5 零点集合法における画像処理の流れ
($SR=20\mu\text{m}$, TiN, Tool-2, C1020-O, $e^c=49\%$)

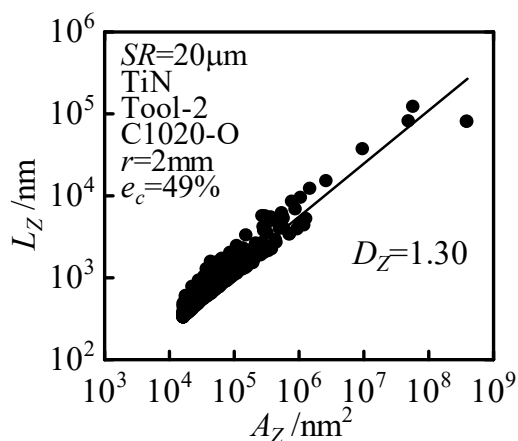
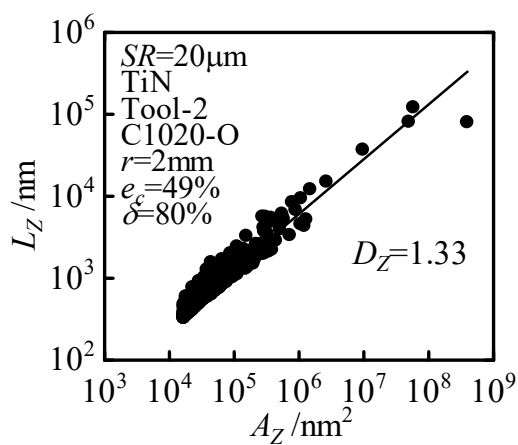
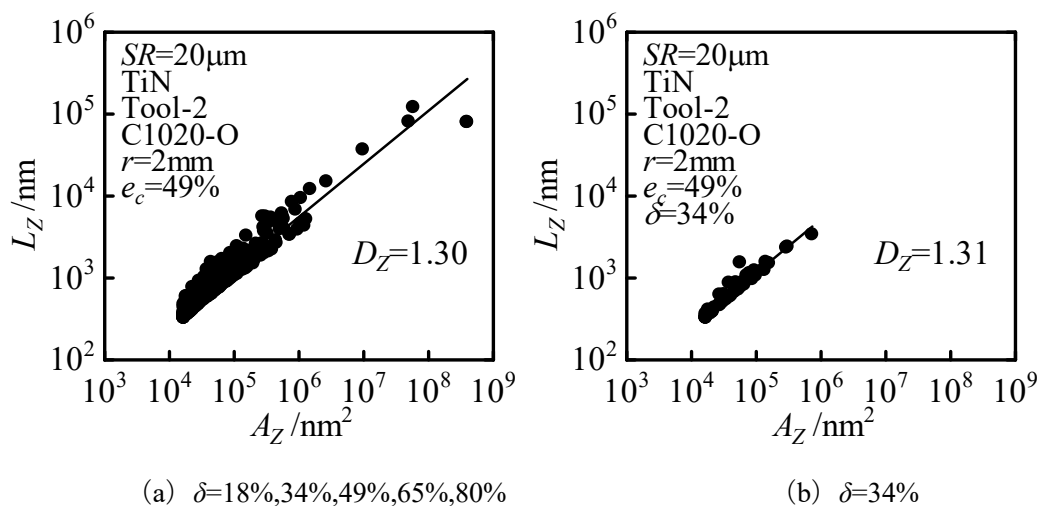
(c) 2値化画像 ($\delta=65\%$)



(a) AFM 画像

(b) フレー画像



Fig.4.6 周囲長 L_Z と面積 A_Z の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O, $e_c=49\%$)(c) $\delta=80\%$ Fig.4.7 相対カット量の違いによる比較 (TiN, Tool-2, C1020-O, $e_c=49\%$)

4.3.2 パワースペクトル次元 D_{PS} の測定法

パワースペクトル法でも 4.3.1 節で説明した傾き補正を行った試料表面画像を用いる。パワースペクトル次元を求めるためには、まず断面曲線より離散的な高さ値を求める必要がある。そこで、その試料表面画像を AFM に備えられている断面形状解析ソフトによって断面曲線 (Fig.4.8 (a)) を表示する。次に、脇⁽²⁰⁾が C 言語を用いて作成したプログラム「一次元 FFT.exe」により高速フーリエ変換 (FFT) を行い、パワースペクトル密度 S_p と波長 λ の関係を得た。このようにして得られたパワースペクトル密度 S_p と波長 λ から、パワースペクトル次元 D_{PS} を算定した (Fig.4.8 (b))。本研究で用いた試験片には方向性があるため、円周方向と半径方向において D_{PS} を求めた。また、得られた D_{PS} は、各試料につき 3 回測定したものの平均値を採用した。

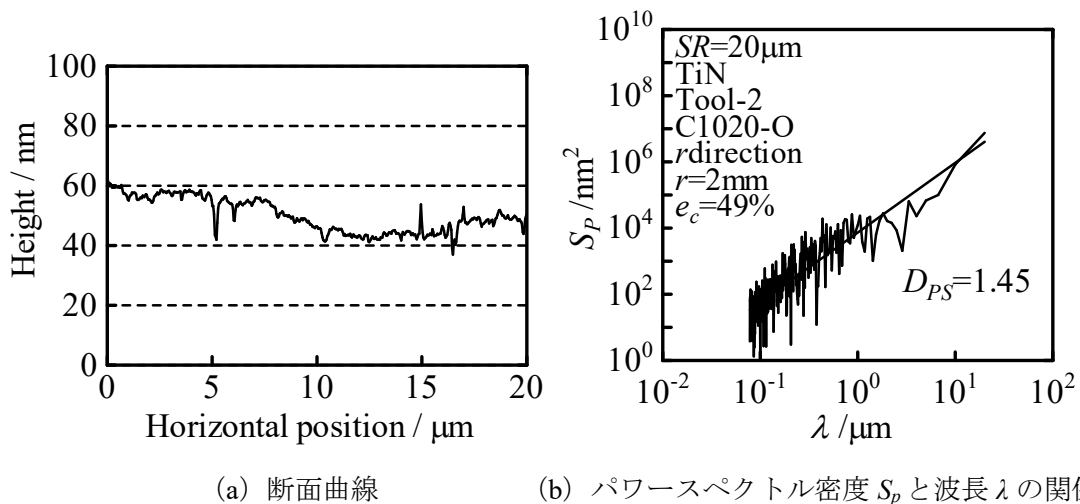


Fig.4.8 パワースペクトル法における処理の流れ (TiN, Tool-2, C1020-O, $e_c=49\%$)

4.4 TiN コーティング工具 Tool-1($R_a=10\text{nm}$), A1050-H における解析結果

4.4.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

零点集合法によって表面細部の凹凸形状について検討する。Fig.4.9 に解析の一例を示す。周囲長 L_Z と面積 A_Z の関係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる。なお、初期工具表面 (Tool-1) の零点集合次元 $D_Z=1.36$ 、初期試験片表面の $D_Z=1.31$ である。

Fig.4.10 に測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率による D_Z の大きな変化は見られず、測定箇所による D_Z の差も小さい。

Fig.4.11 に零点集合次元 D_Z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。 S_a が小さくなると D_Z は大きくなる傾向が見られる。

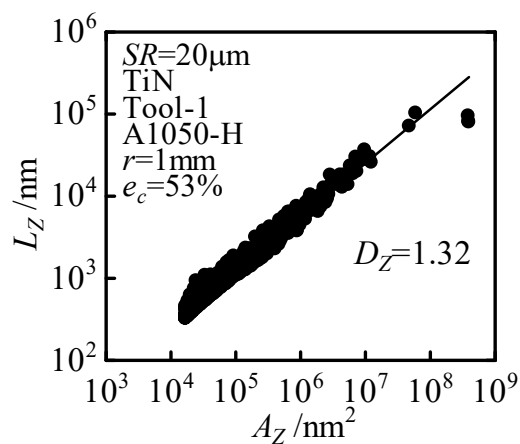


Fig.4.9 零点集合次元法による解析の一例 ($SR=20\mu\text{m}$, TiN, Tool-1, A1050-H, $e_c=53\%$)

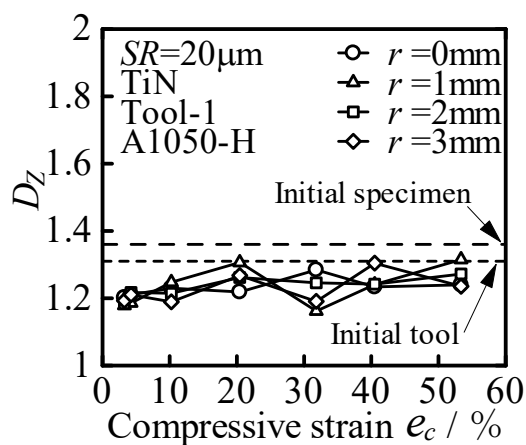


Fig.4.10 零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H)

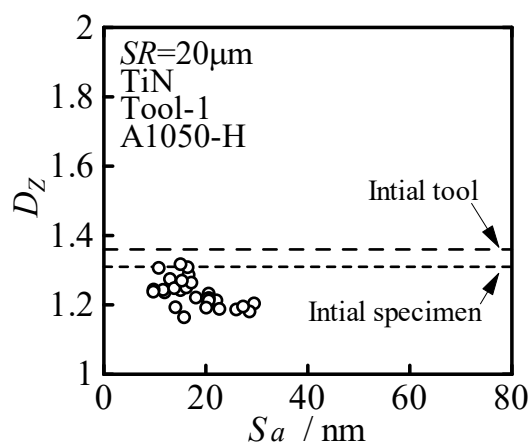


Fig.4.11 零点集合次元 D_Z と算術平均面粗さ S_a の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H)

4.4.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

次に、パワースペクトル法によって表面細部の凹凸形状について検討する。Fig.4.12 に試験片表面の断面曲線と FFT 解析結果の一例を示す。パワースペクトル密度 S_p と波長 λ の関係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる。なお、初期工具表面 (Tool-1) のパワースペクトル次元 $D_{PS}=1.05$ 、初期試験片の $D_{PS}=1.00$ であった。

Fig.4.13 に θ 方向, r 方向における測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す。 θ 方向, r 方向ともに圧縮率による D_{PS} のばらつきが大きい。 r 方向では θ 方向と比べて測定箇所による D_{PS} のばらつきが小さい。

Fig.4.14 に θ 方向, r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。 θ 方向, r 方向ともに, S_a が小さくなると D_{PS} が大きくなる傾向がある。

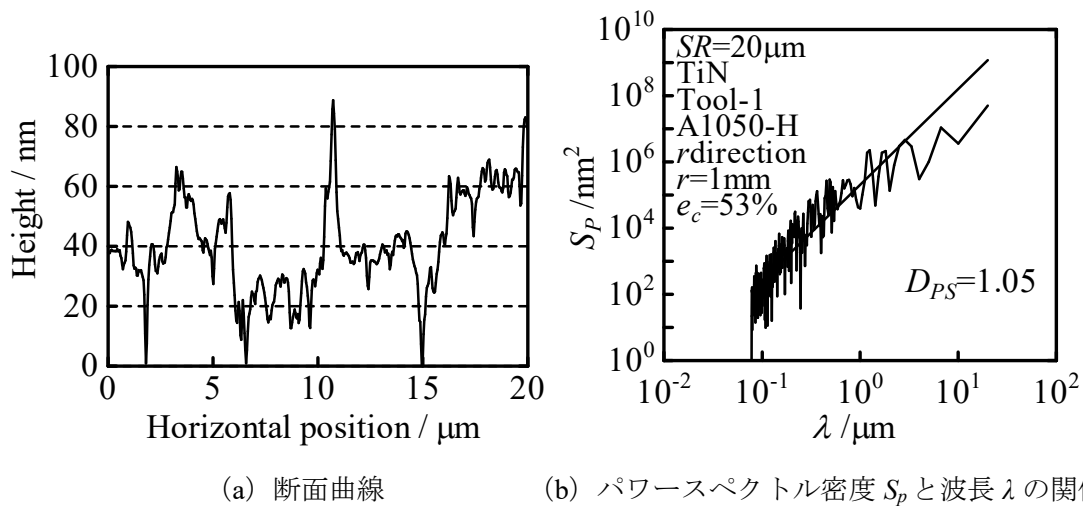


Fig.4.12 断面曲線および FFT 解析結果 (TiN, Tool-1, A1050-H, $e_c=53\%$, $r=1\text{mm}$)

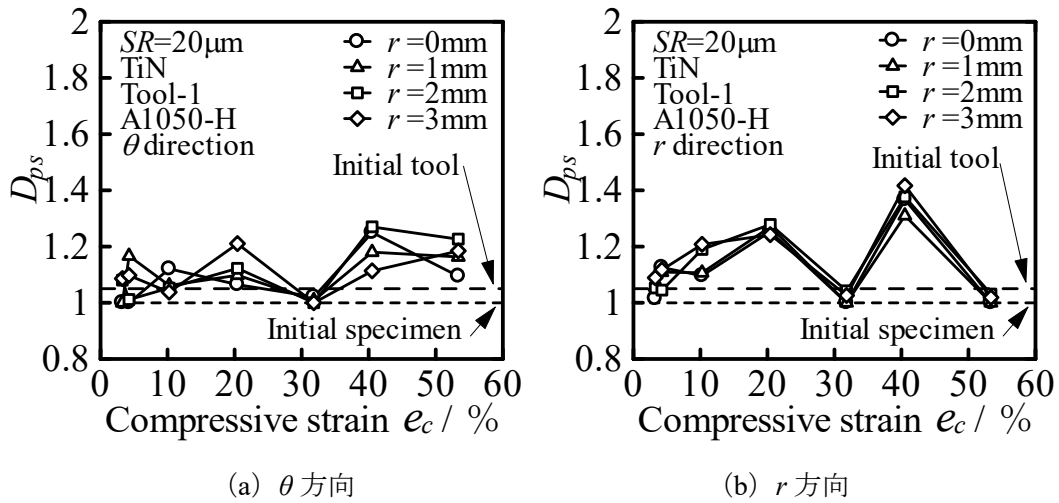


Fig.4.13 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H)

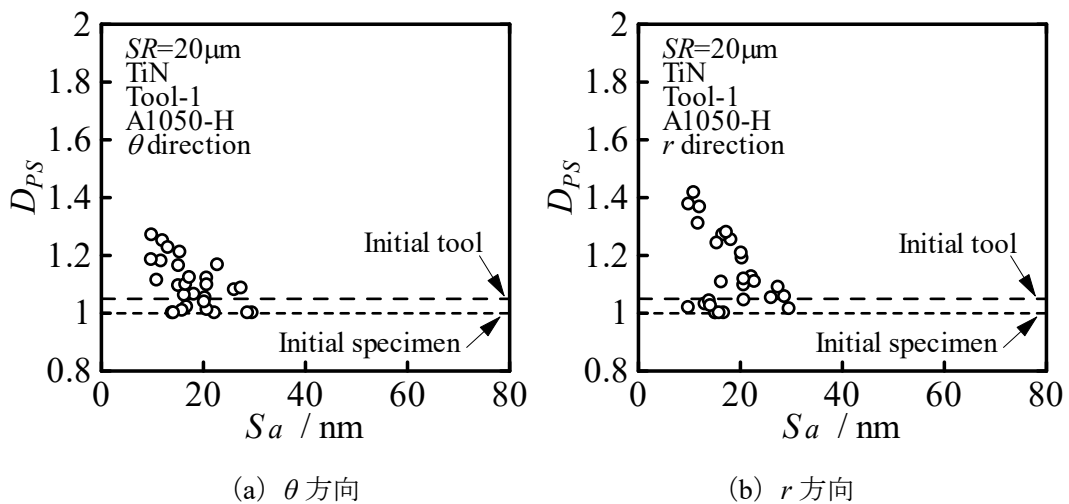


Fig.4.14 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (TiN, Tool-1, A1050-H)

4.5 TiN コーティング Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$), C1020-O における解析結果

4.5.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

零点集合法によって表面細部の凹凸形状について検討する. Fig.4.15 に解析の一例を示す. 周囲長 L_Z と面積 A_Z の関係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる. なお, 初期工具表面 (Tool-1) の零点集合次元 $D_Z=1.36$, 初期試験片表面の $D_Z=1.31$ である.

Fig.4.16 に測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す. 圧縮率による D_Z の大きな変化は見られず, 測定箇所による D_Z のばらつきは小さいことがわかる.

Fig.4.17 に零点集合次元 D_Z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. D_Z が初期試験片よりも小

さくなる傾向が見られる。

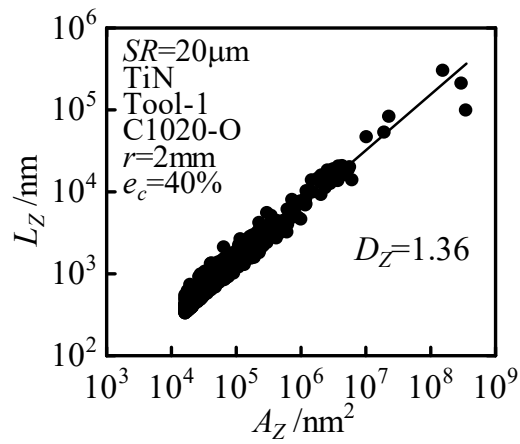


Fig.4.15 零点集合次元法による解析の一例 ($SR=20\mu\text{m}$, TiN, Tool-1, C1020-O, $e_c=40\%$)

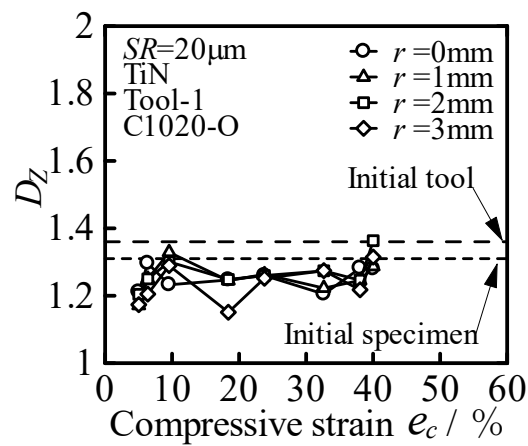


Fig.4.16 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O)

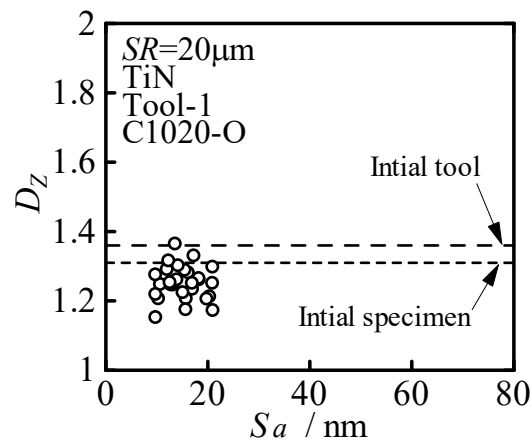


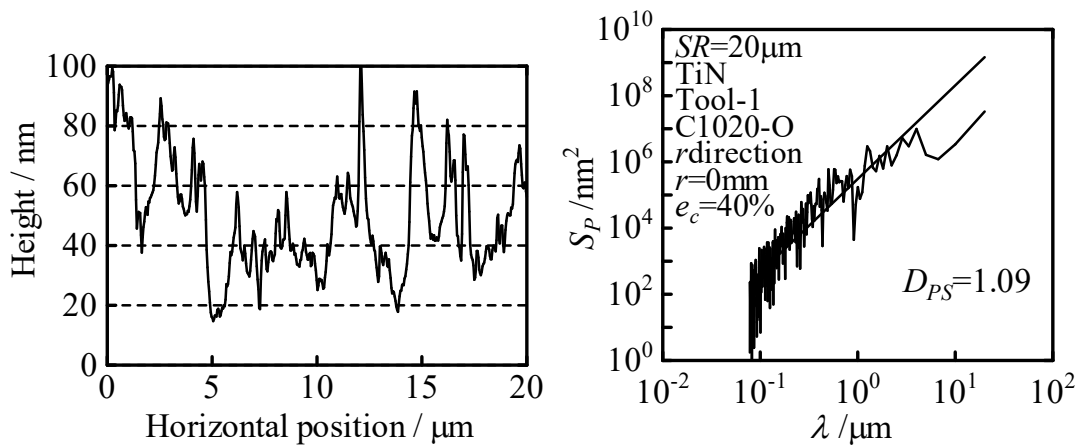
Fig.4.17 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O)

4.5.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

次に、パワースペクトル法によって表面細部の凹凸形状について検討する。Fig.4.18に試験片表面の断面曲線とFFT解析結果の一例を示す。パワースペクトル密度 S_p と波長 λ の関係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる。なお、初期工具表面 (Tool-1) のパワースペクトル次元 $D_{PS}=1.05$ 、初期試験片の $D_{PS}=1.00$ であった。

Fig.4.19に θ 方向、 r 方向における測定箇所 $r=0\text{mm}$ 、 $r=1\text{mm}$ 、 $r=2\text{mm}$ 、 $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す。 θ 方向、 r 方向ともに D_{PS} と e_c の間にはっきりとした傾向は見られない。初期試験片の D_{PS} よりは大きな値となっている。

Fig.4.20に θ 方向、 r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。 θ 方向、 r 方向ともに S_a が小さいときに D_{PS} が大きくなる傾向が見られる。



(a) 断面曲線

(b) パワースペクトル密度 S_p と波長 λ の関係

Fig.4.18 断面曲線およびFFT解析結果 (TiN, Tool-1, C1020-O, $r=2\text{mm}$, $e_c=40\%$)

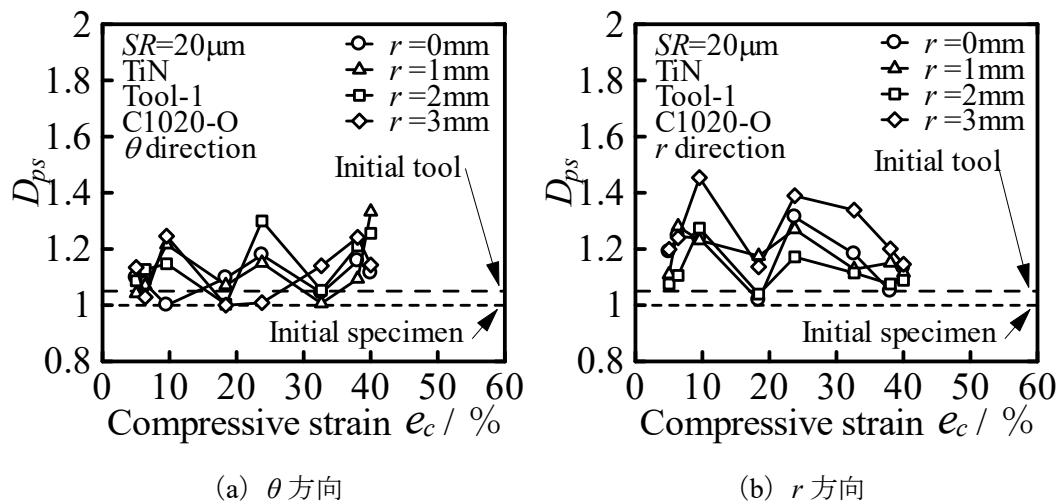
(a) θ 方向(b) r 方向

Fig.4.19 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O)

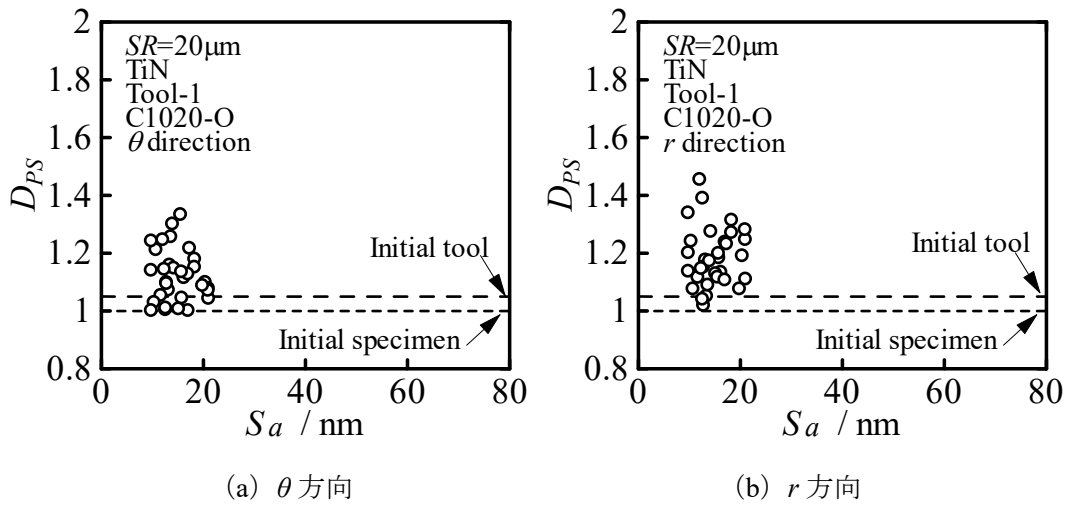


Fig.4.20 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (TiN, Tool-1, C1020-O)

4.6 TiN コーティング Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$), C1020-O における解析結果

4.6.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

零点集合法によって表面細部の凹凸形状について検討する. Fig.4.21 に解析の一例を示す. 周囲長 L_Z と面積 A_Z の関係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる. なお, 初期工具表面 (Tool-2) の零点集合次元 $D_Z=1.31$, 初期試験片表面の $D_Z=1.31$ である.

Fig.4.22 に測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す. D_Z のばらつきが大きく, はっきりとした規則性は見られない.

Fig.4.23 に零点集合次元 D_Z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. S_a が小さくなると D_Z のばらつきが大きくなる傾向が見られる.

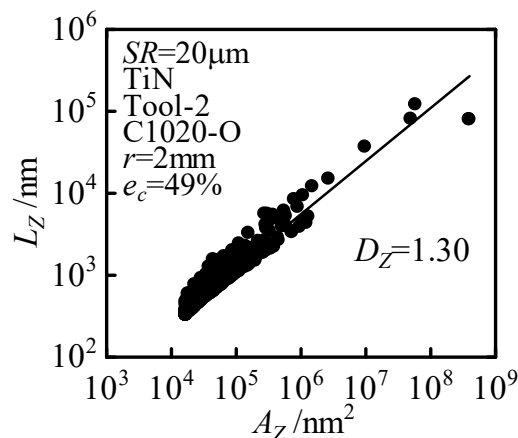


Fig.4.21 零点集合次元法による解析の一例 ($SR=20\mu\text{m}$, TiN, Tool-2, C1020-O, $e_c=49\%$)

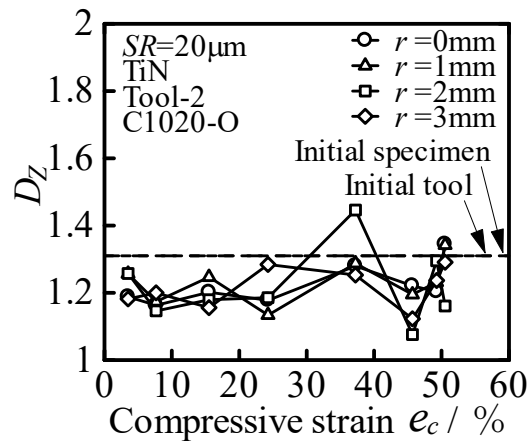


Fig.4.22 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O)

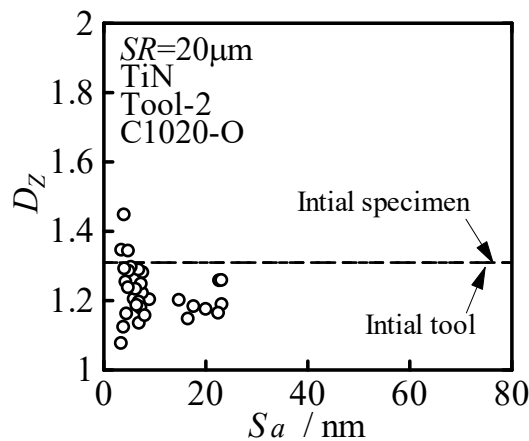


Fig.4.23 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O)

4.6.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

次に、パワースペクトル法によって表面細部の凹凸形状について検討する。Fig.4.24に試験片表面の断面曲線とFFT解析結果の一例を示す。パワースペクトル密度 S_p と波長 λ の関係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる。初期工具表面 (Tool-2) のパワースペクトル次元 $D_{PS}=1.46$ 、初期試験片表面の $D_{PS}=1.00$ であった。

Fig.4.25に θ 方向、 r 方向における測定箇所 $r=0\text{mm}$ 、 $r=1\text{mm}$ 、 $r=2\text{mm}$ 、 $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す。 θ 方向、 r 方向ともに D_{PS} と e_c の間には、はっきりとした傾向は見られない。

Fig.4.26に θ 方向、 r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。 θ 方向、 r 方向ともに S_a が小さいときに D_{PS} が大きくなる傾向が見られる。

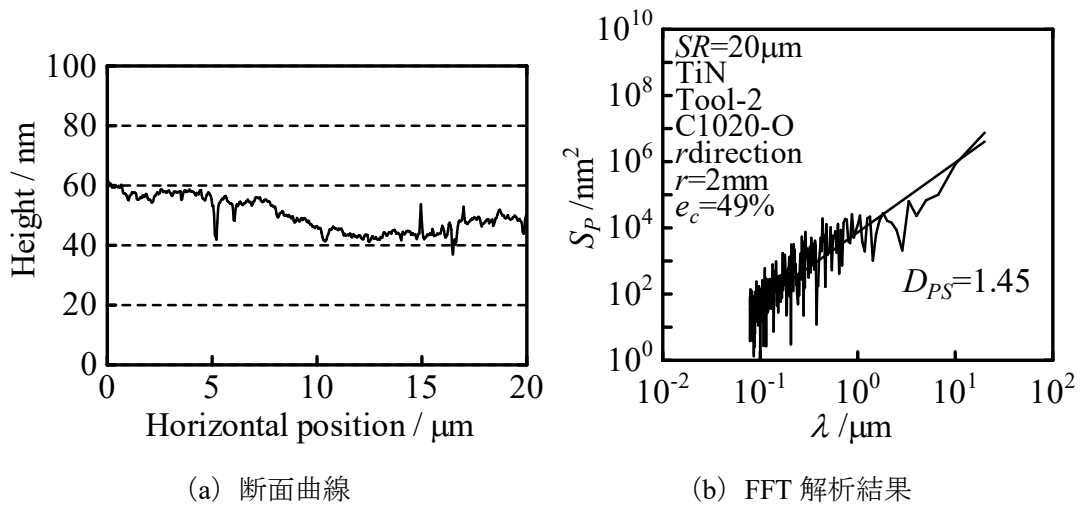


Fig.4.24 断面曲線およびFFT解析結果 (TiN, Tool-2, C1020-O, $r=2\text{mm}$, $e_c=49\%$)

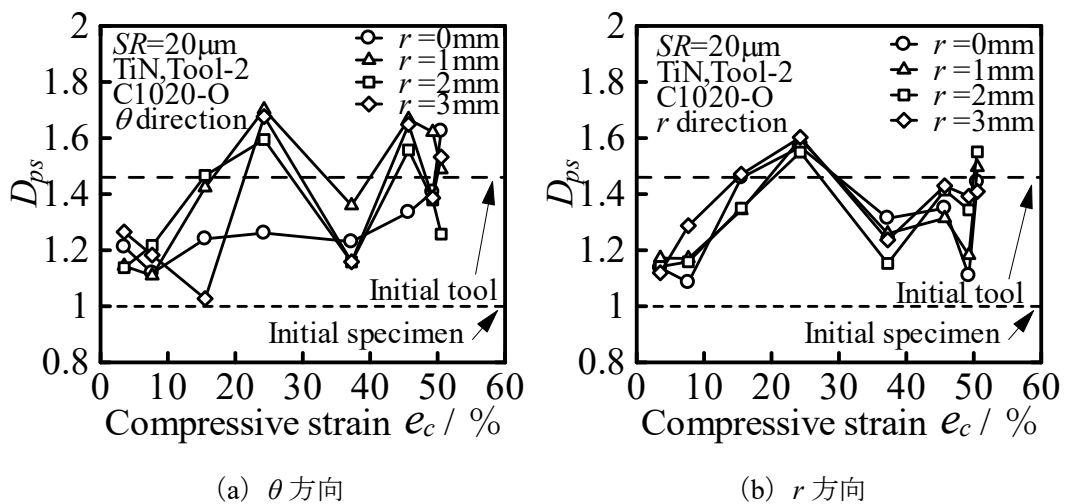


Fig.4.25 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O)

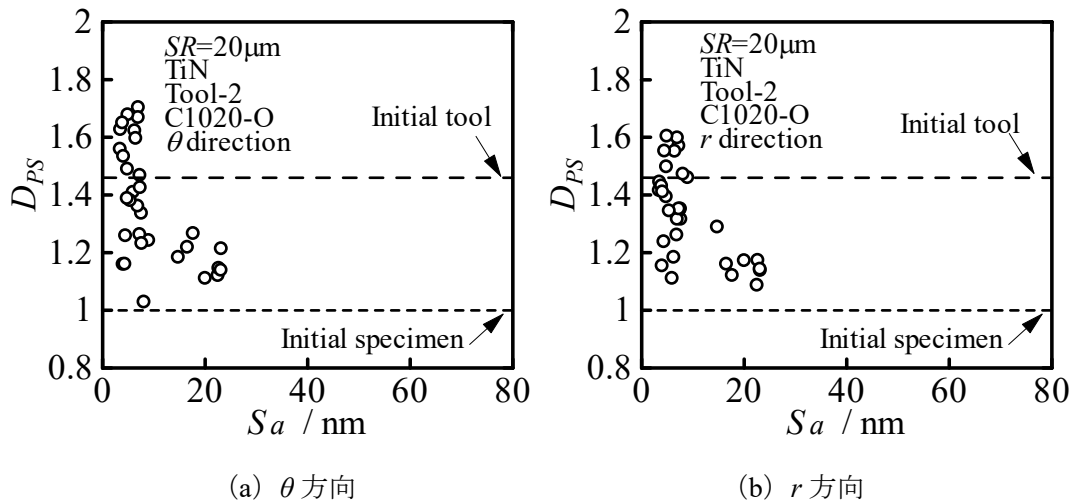


Fig.4.26 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (TiN, Tool-2, C1020-O)

4.7 加工硬化の影響

加工硬化の影響を調べるため、TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った A1050-H の圧縮試験結果と過去に行った A1050-O の圧縮試験結果⁽²⁵⁾の比較、TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った C1020-O の圧縮試験結果と過去に行った C1020-H の圧縮試験結果⁽²⁴⁾の比較、TiN コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った C1020-O の圧縮試験結果と過去に行った C1020-H の圧縮試験結果⁽²⁴⁾の比較を行う。

4.7.1 零点集合次元 D_z による加工品表面の解析結果

Fig.4.27 に TiN, Tool-1, アルミニウムの測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの測定箇所においても低圧縮率で H 材の方が D_z が小さいことがわかる。

Fig.4.28 に TiN, Tool-1, 銅の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの測定箇所においても低圧縮率で O 材の方が D_z が小さいことがわかる。

Fig.4.29 に TiN, Tool-2, 銅の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。 D_z と e_c の間にはばらつきが大きく加工硬化の影響は見られない。

Fig.4.30 に各条件における零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。いずれの条件においても、引抜き材、焼きなまし材の間にはっきりとした規則性はなく、加工硬化の影響は見られない。

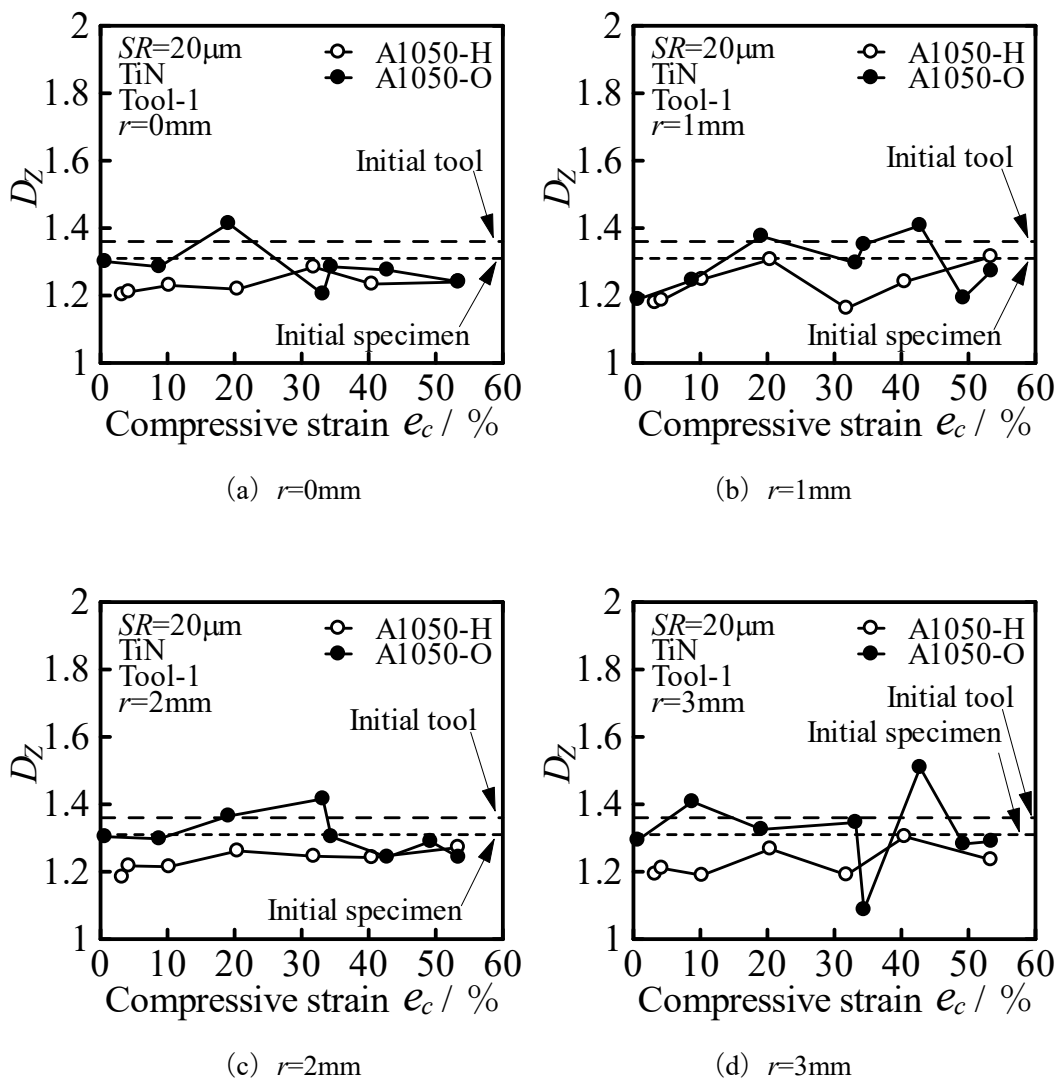


Fig.4.27 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, アルミニウム)

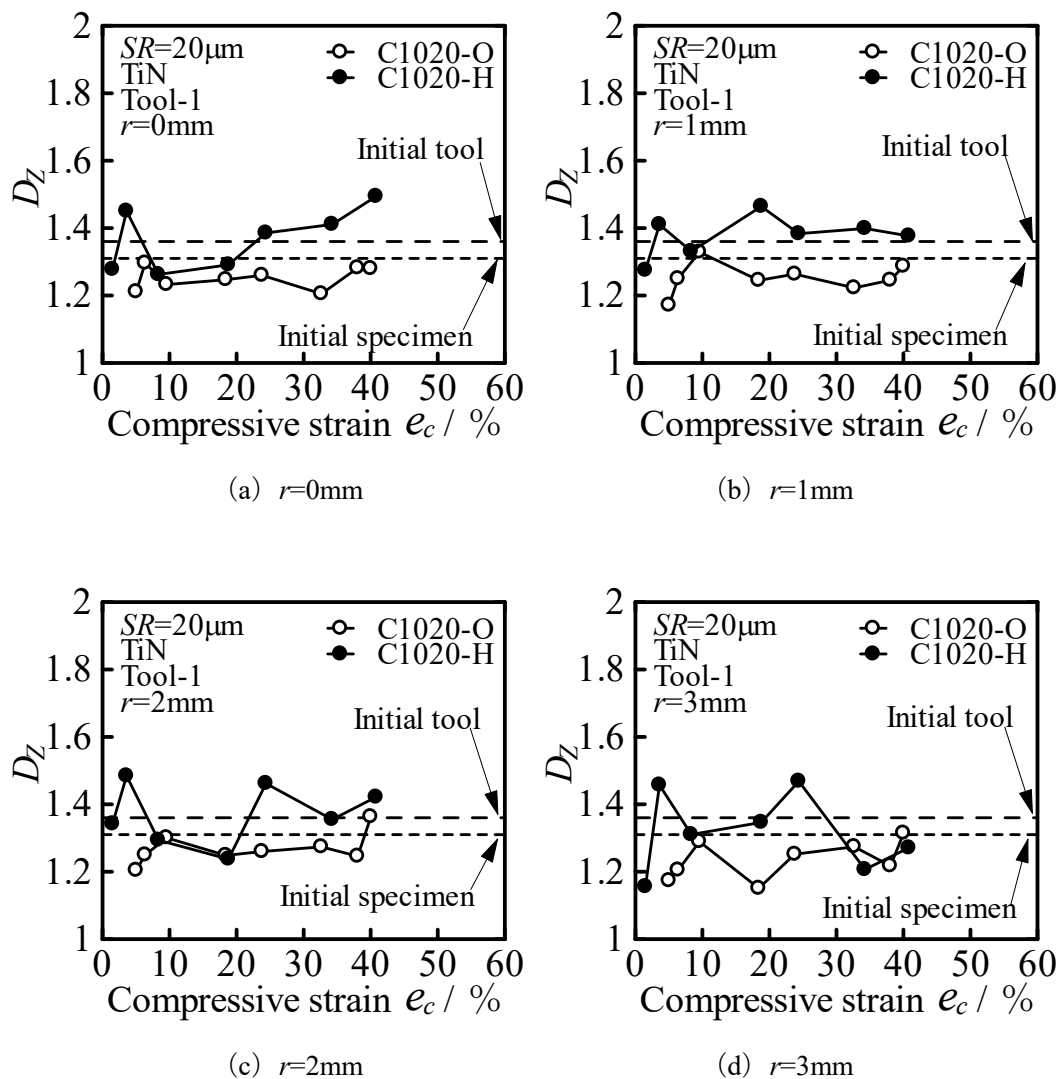


Fig.4.28 零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, 銅)

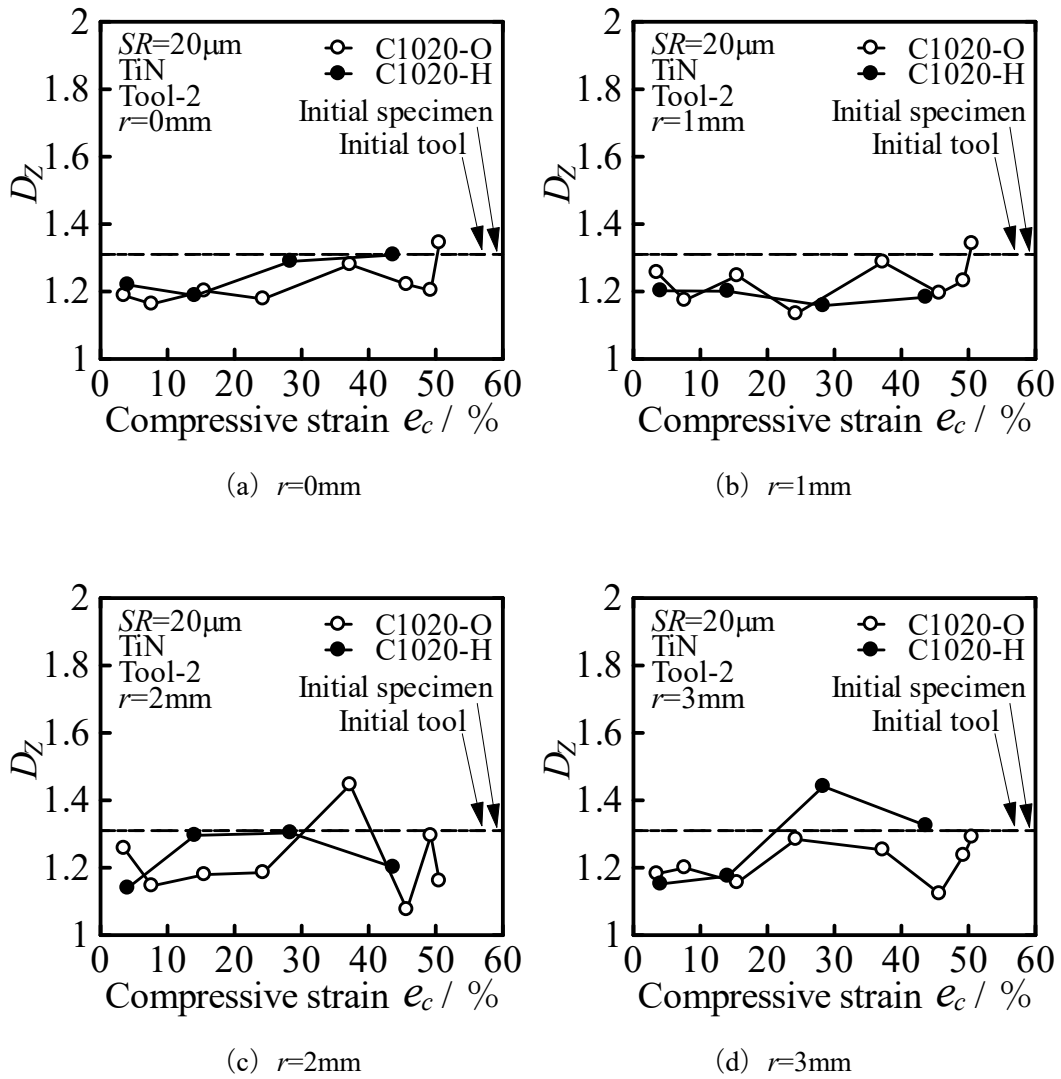


Fig.4.29 零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-2, 銅)

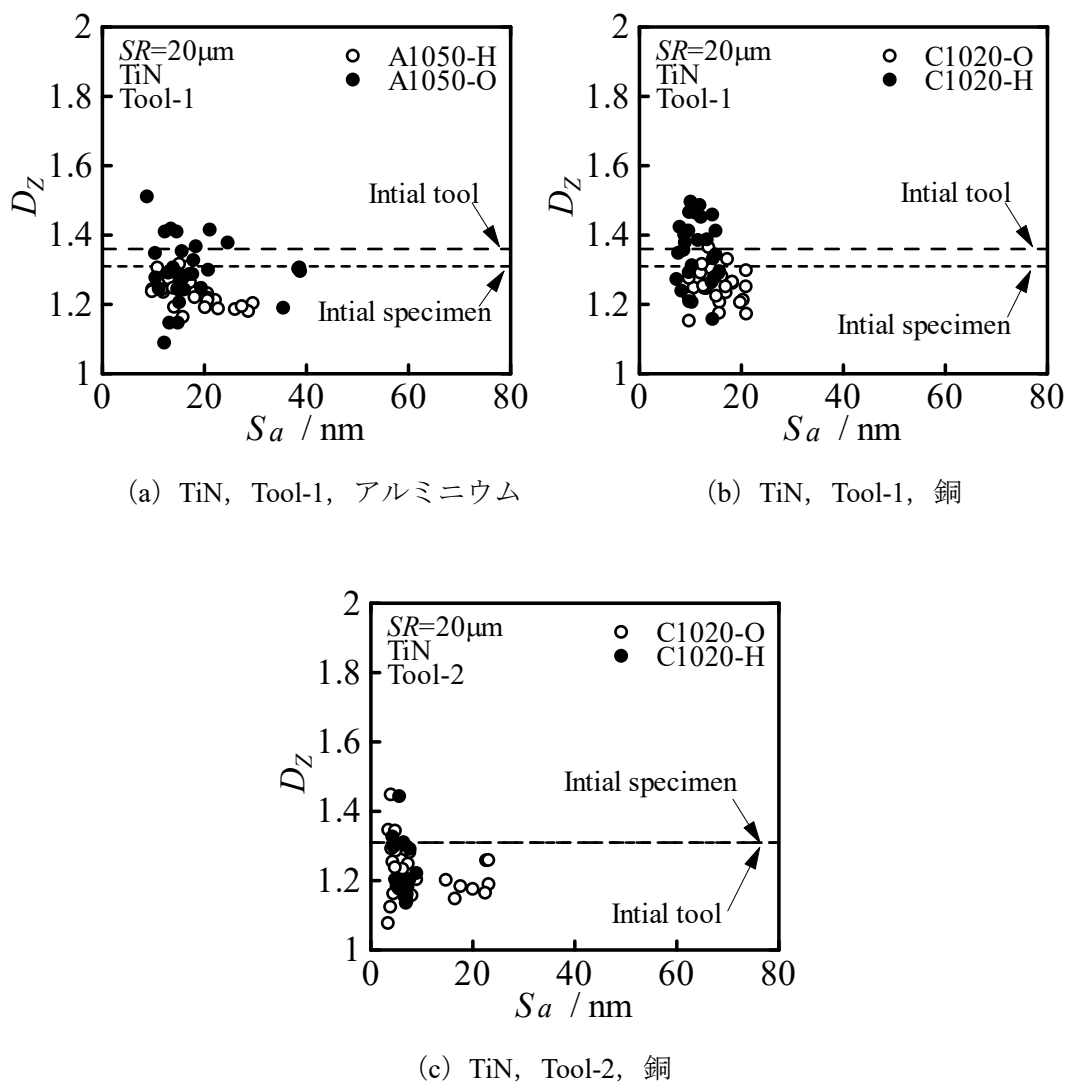


Fig.4.30 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係

4.7.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

Fig.4.31 に θ 方向, Fig.4.32 に r 方向における TiN, Tool-1, アルミニウムの測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向では r 方向と比べると両者の D_{PS} の差が小さくなっている. r 方向の H 材では O 材と比較して, 圧縮率による D_{PS} のばらつきが大きいことがわかる.

Fig.4.33 に θ 方向, Fig.4.34 に r 方向における TiN, Tool-1, 銅の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向, r 方向ともにばらつきが大きく, はっきりとした加工硬化の影響は見られない.

Fig.4.35 に θ 方向, Fig.4.36 に r 方向における TiN, Tool-2, 銅の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向, r 方向ともにばらつきが大きく, 加工硬化の影響は見られない.

Fig.4.37 に θ 方向, r 方向における TiN, Tool-1, アルミニウムのパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに加工硬化の影響は見られない.

Fig.4.38 に θ 方向, r 方向における TiN, Tool-1, 銅のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに加工硬化の影響は見られない.

Fig.4.39 に θ 方向, r 方向における TiN, Tool-2, 銅のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向では O 材の方が D_{PS} のばらつきが大きくなっている. r 方向では加工硬化の影響は見られない.

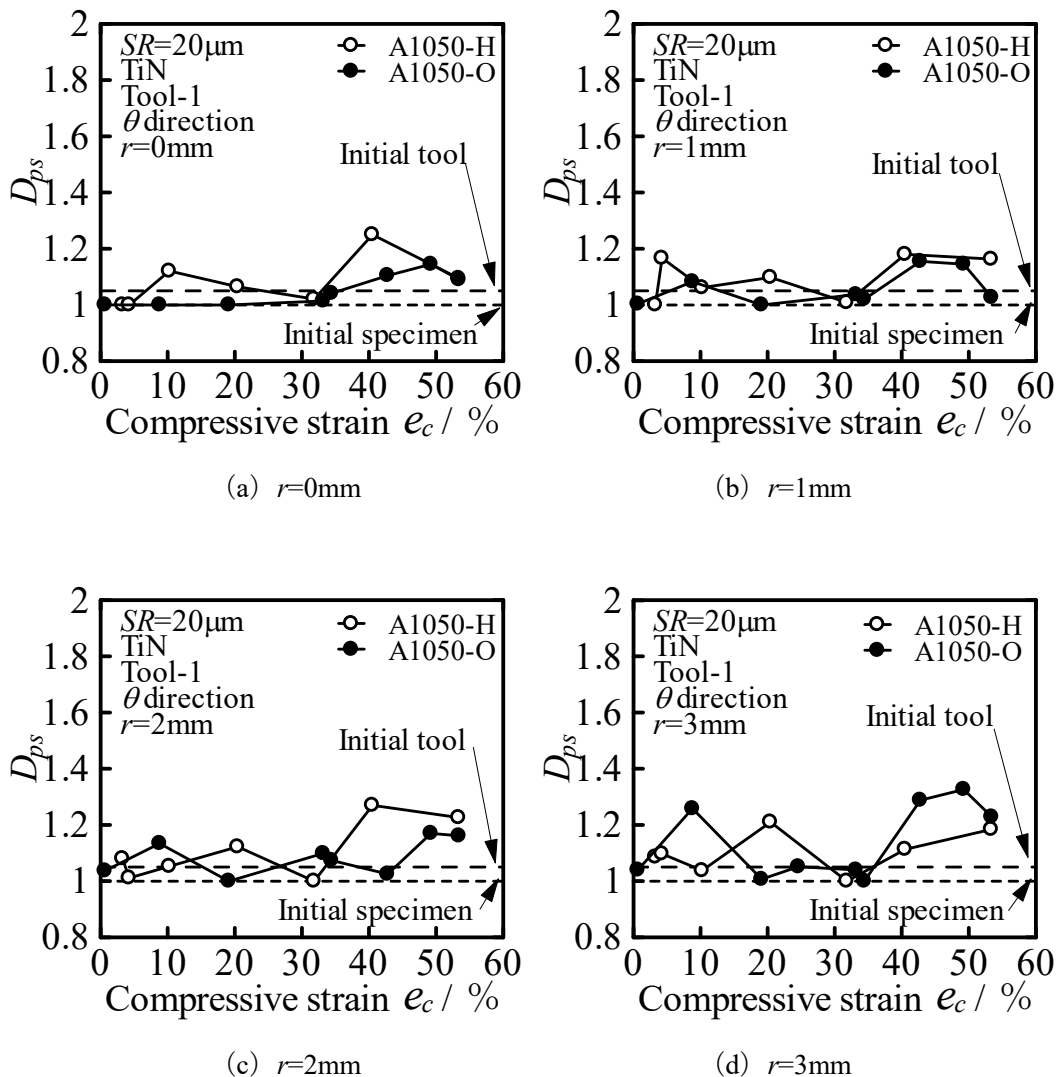


Fig.4.31 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係
(TiN, Tool-1, アルミニウム, θ 方向)

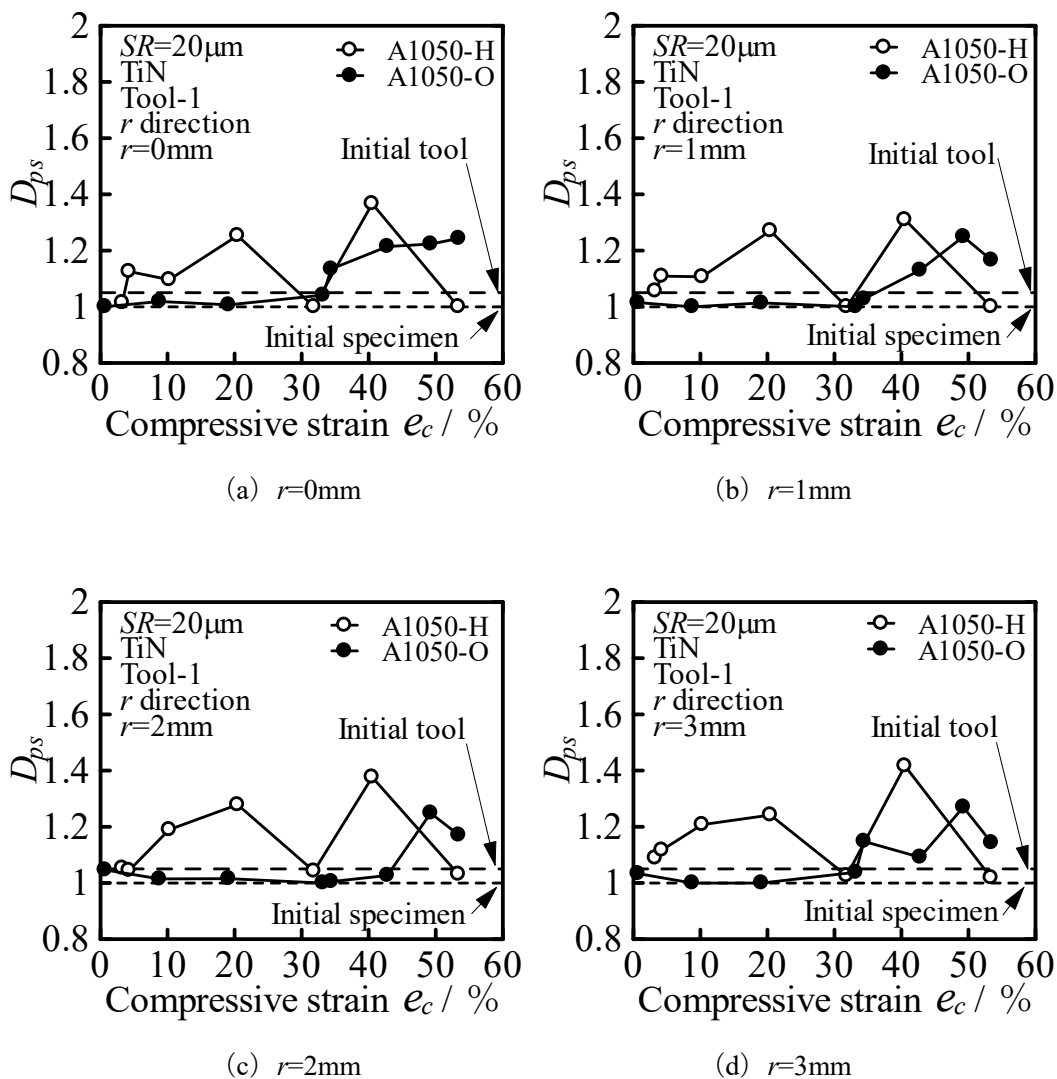


Fig.4.32 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係
(TiN, Tool-1, アルミニウム, r 方向)

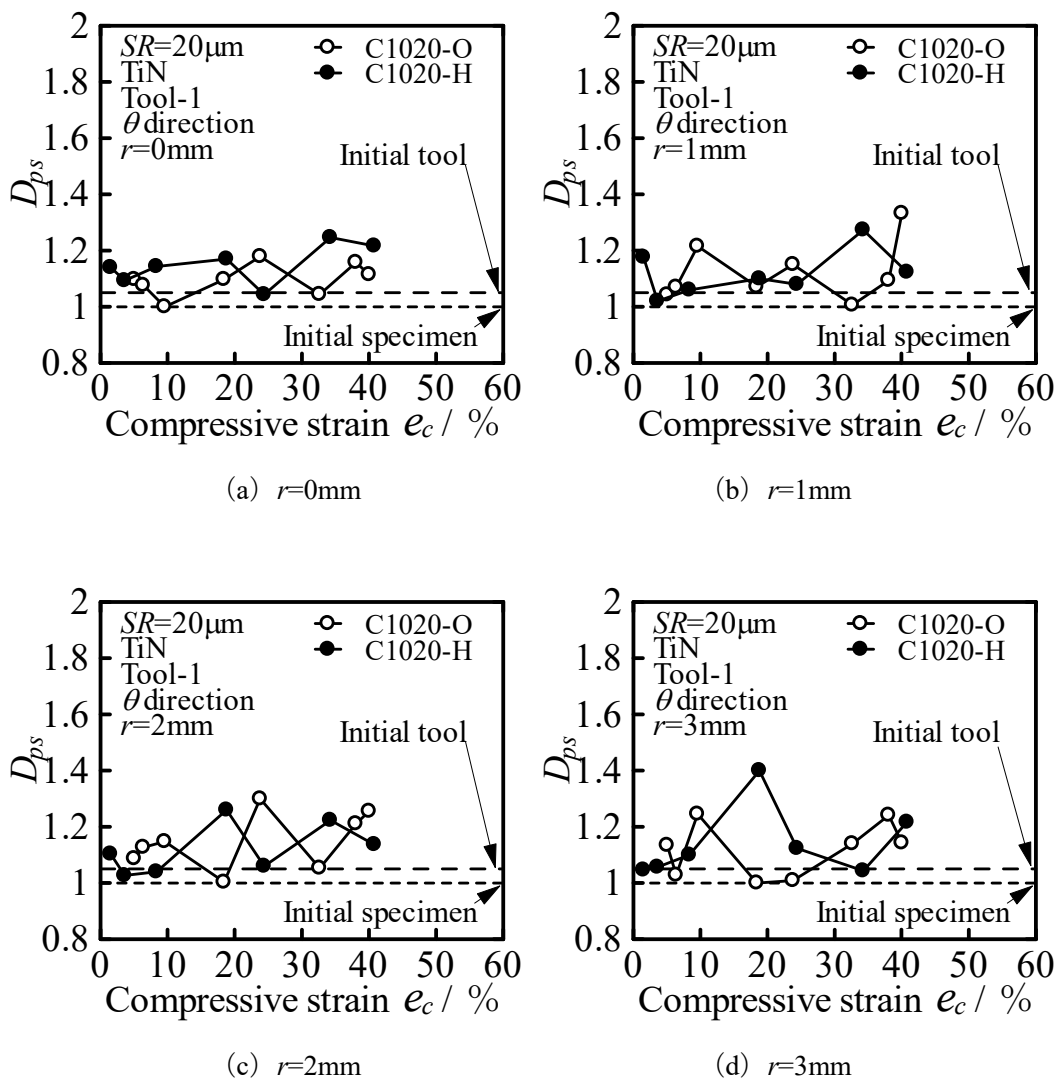


Fig.4.33 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係
(TiN, Tool-1, 銅, θ 方向)

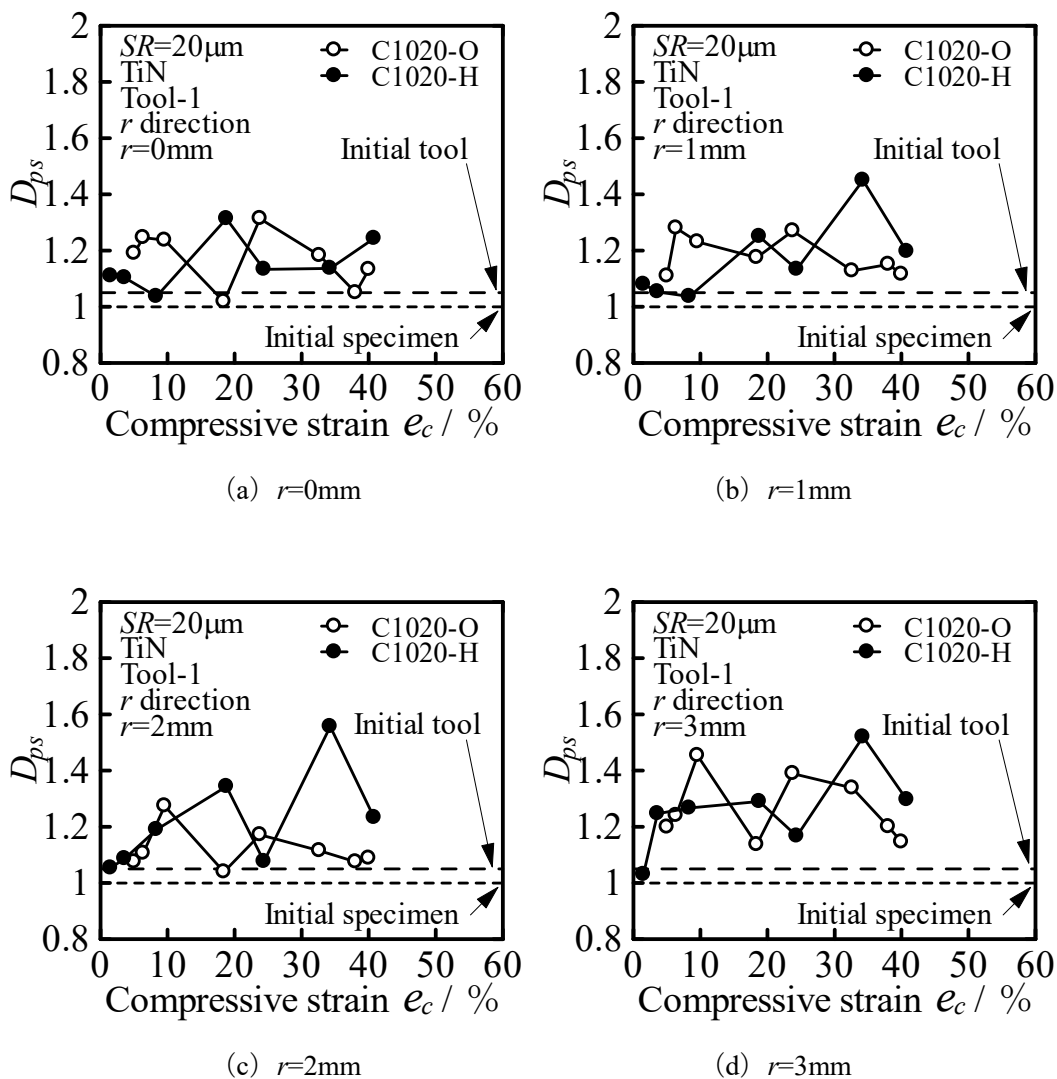


Fig.4.34 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係
(TiN, Tool-1, 銅, r 方向)

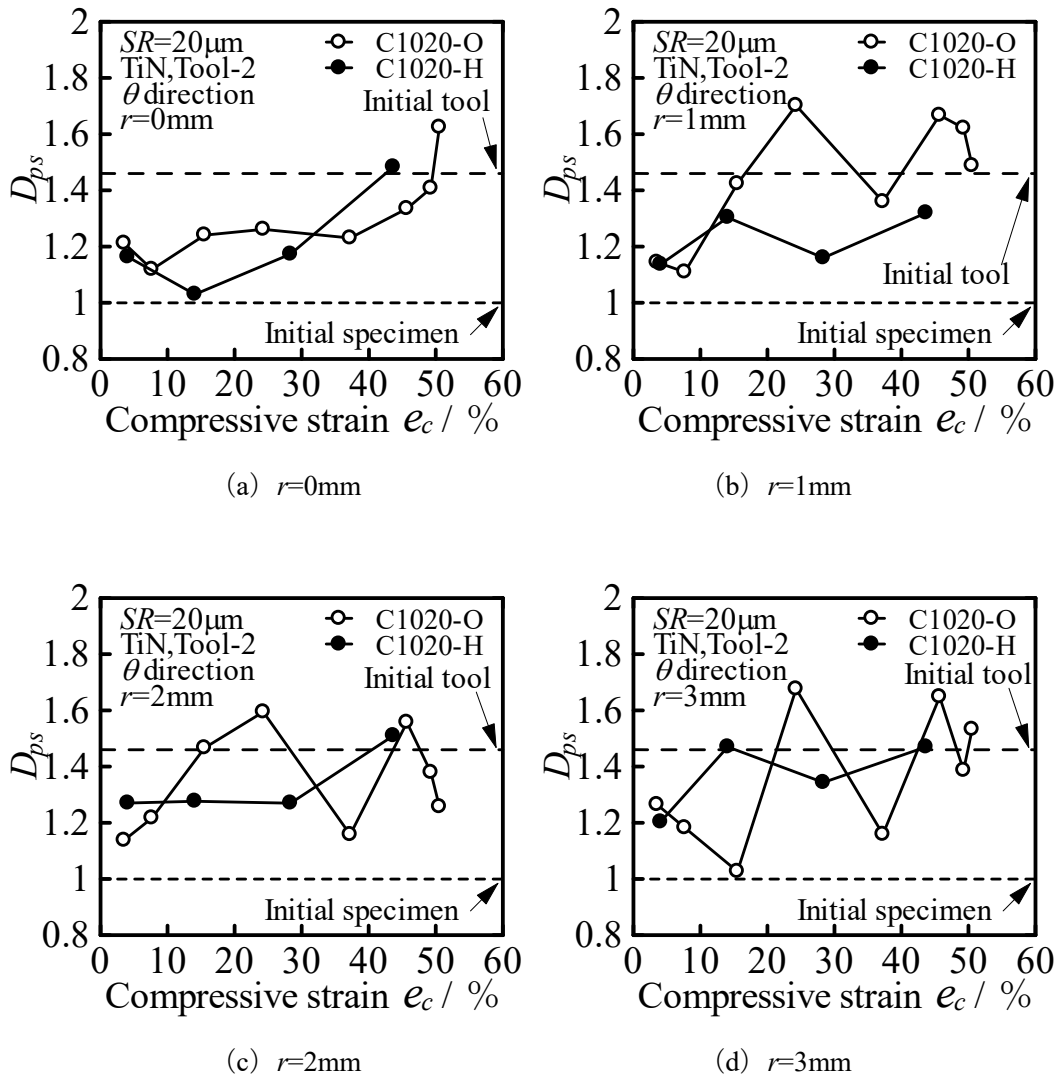


Fig.4.35 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係
(TiN, Tool-2, 銅, θ 方向)

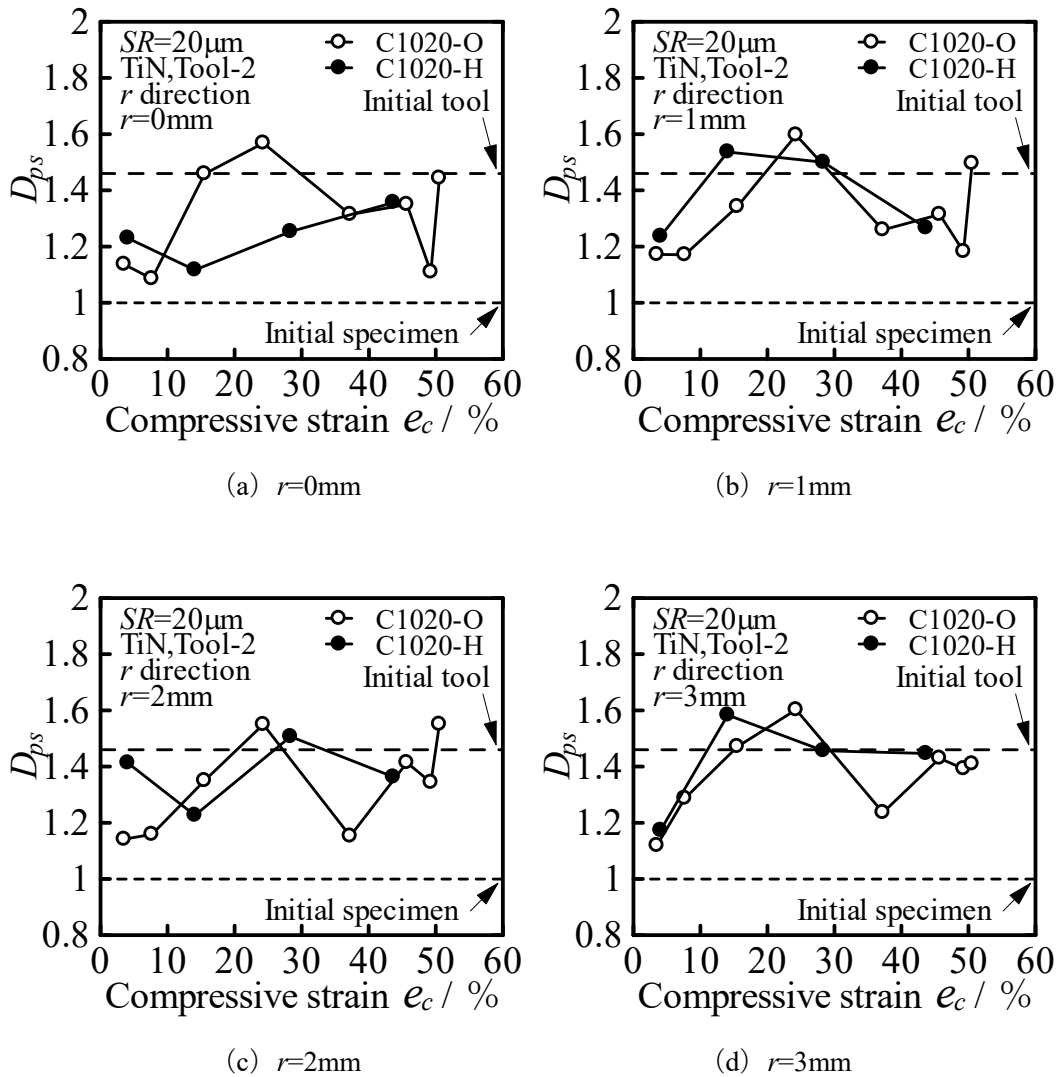


Fig.4.36 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係
(TiN, Tool-2, 銅, r 方向)

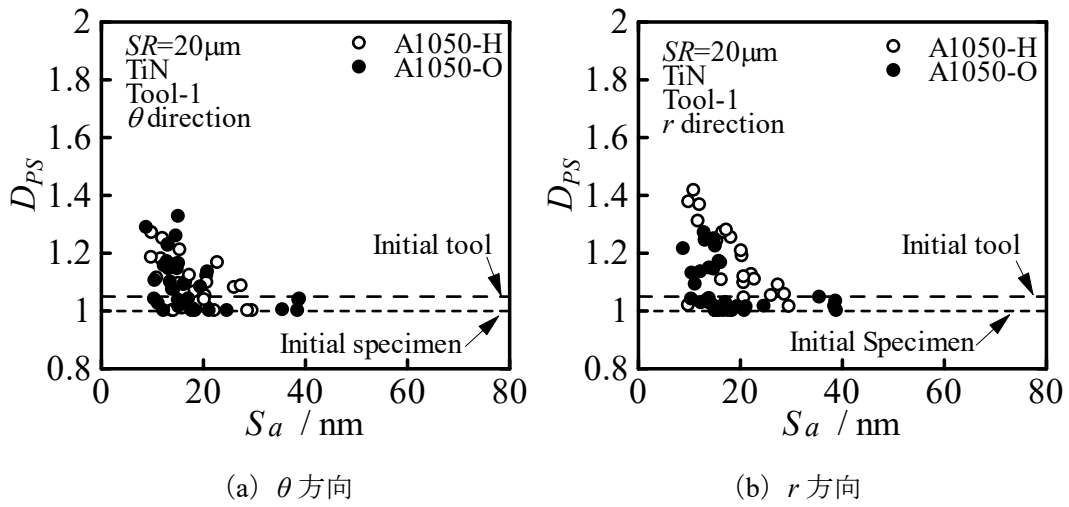


Fig.4.37 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係
(TiN, Tool-1, アルミニウム)

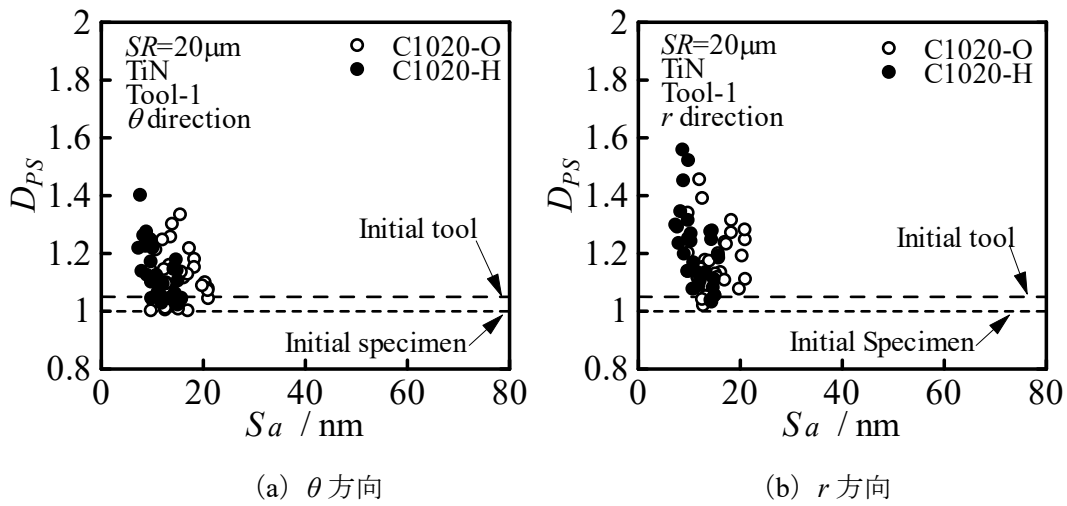


Fig.4.38 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係
(TiN, Tool-1, 銅)

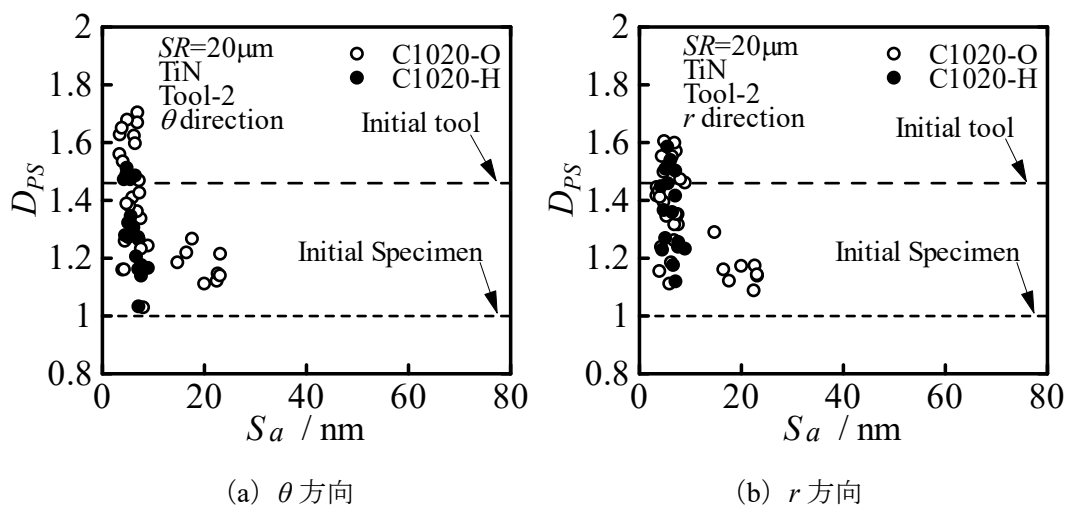


Fig.4.39 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係
(TiN, Tool-2, 銅)

4.8 工具表面粗さの影響

工具表面粗さの影響を調べるため、A1050-H における今回行った TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) の圧縮試験結果と過去に行った TiN コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) の圧縮試験結果⁽²⁵⁾の比較、今回行った C1020-O における TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) の圧縮試験結果と TiN コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) の圧縮試験結果の比較を行う。

4.8.1 零点集合次元 D_z による加工品表面の解析結果

Fig.4.40 に TiN, A1050-H の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。低圧縮率では大きな違いは見られないが、高圧縮率では D_z の差が大きいことがわかる。

Fig.4.41 に TiN, C1020-O の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの測定箇所においても工具表面粗さの影響は見られない。

Fig.4.42 に各条件の零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。TiN, A1050-H においては工具表面粗さの影響は見られない。TiN, C1020-O においては Tool-2 より Tool-1 の方が D_z が大きい傾向が見られるが、はっきりとした理由は不明である。

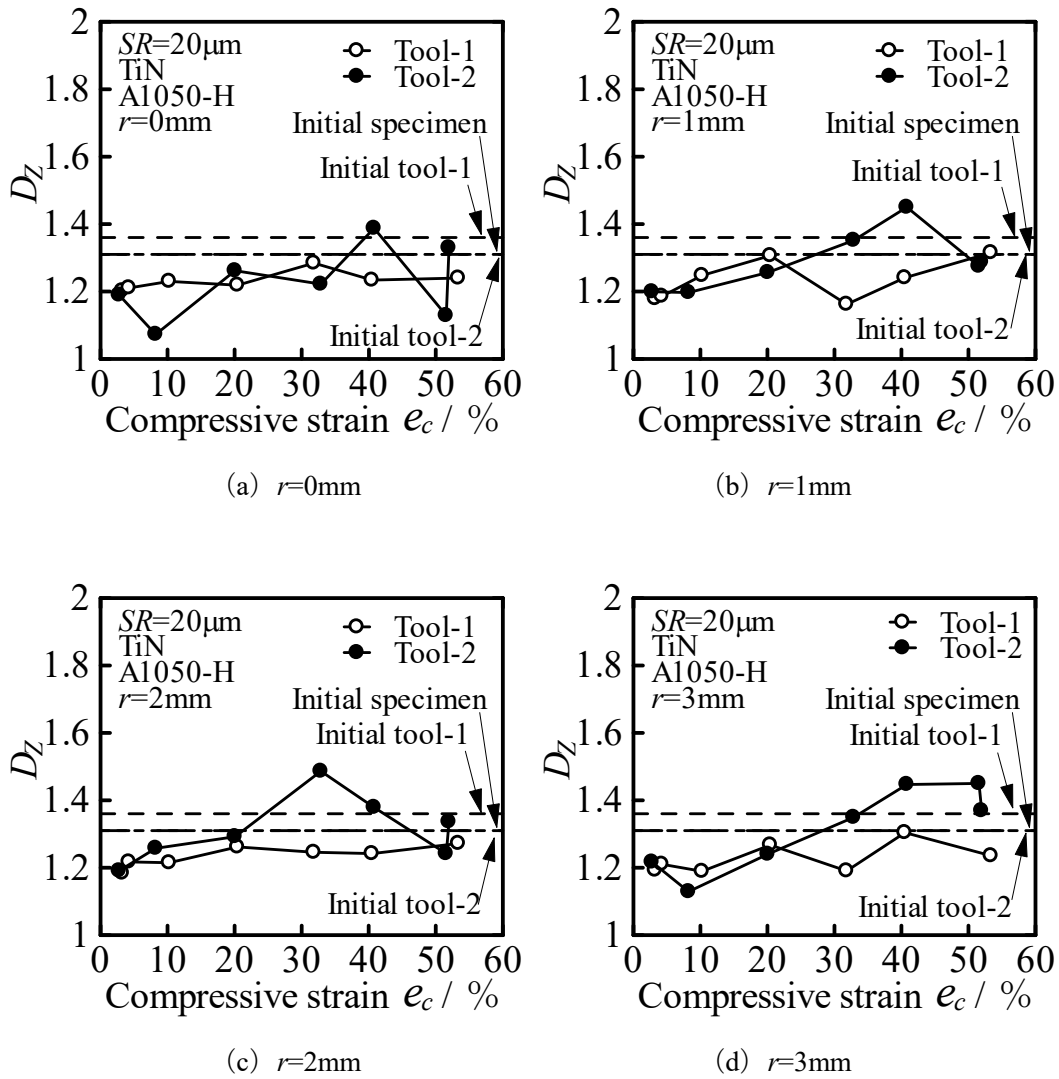


Fig.4.40 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (TiN, A1050-H)

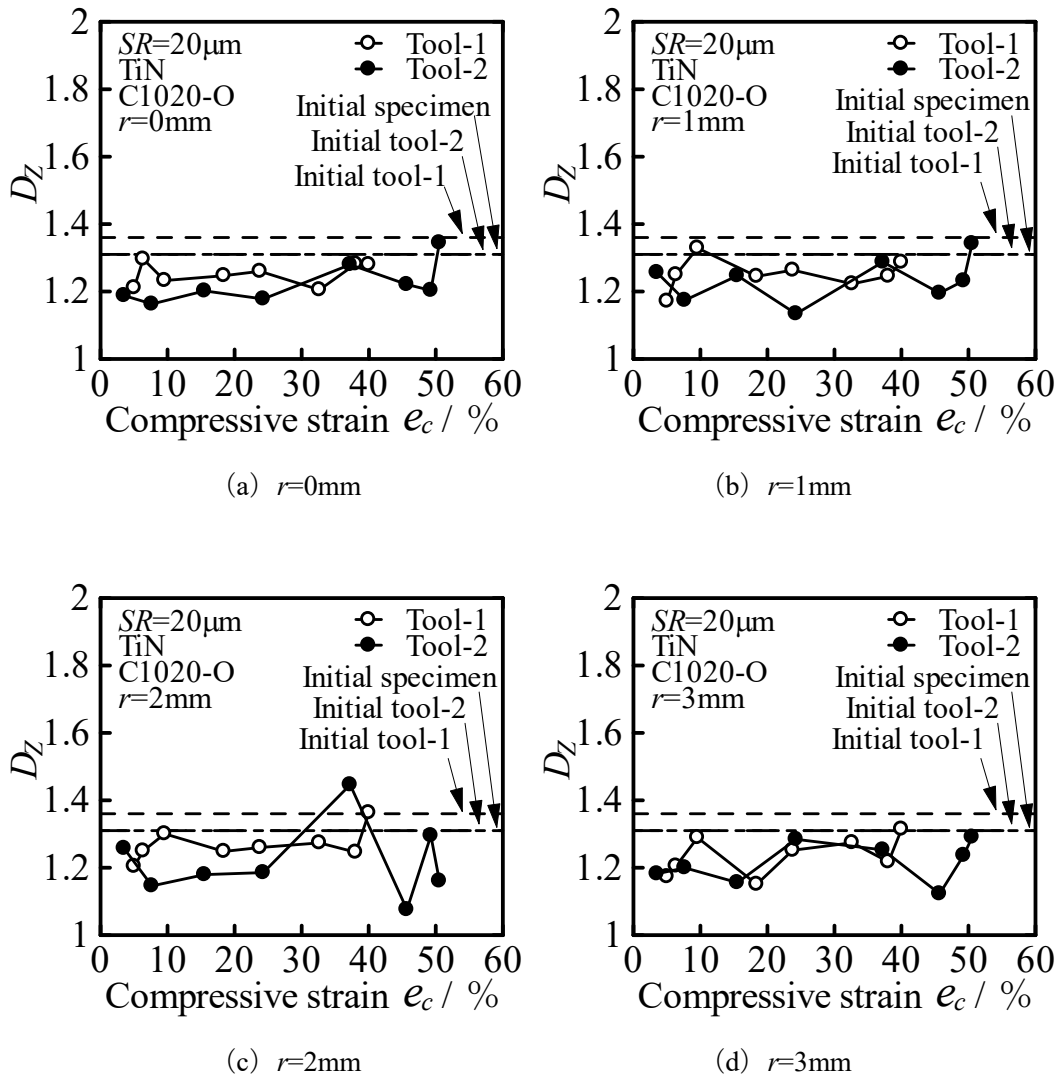
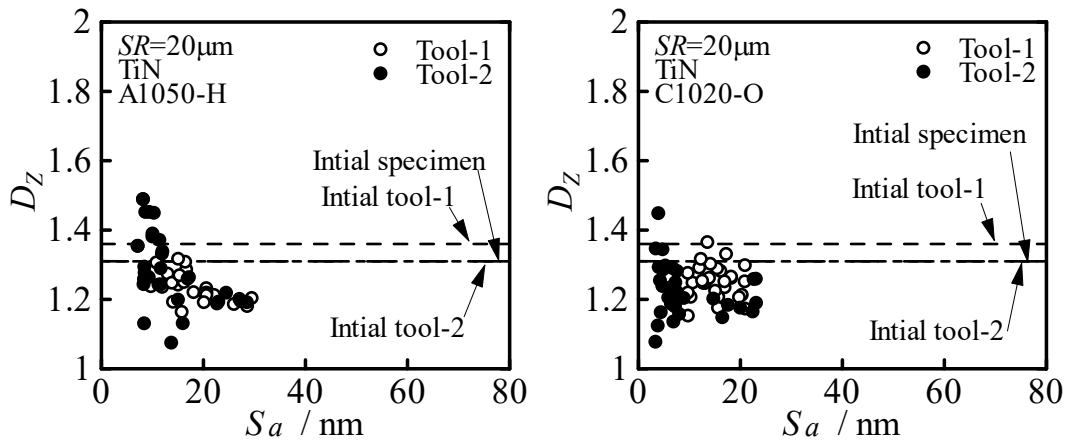


Fig.4.41 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (TiN, C1020-O)



(a) TiN, A1050-H

(b) TiN, C1020-O

Fig.4.42 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係

4.8.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

Fig.4.43 に θ 方向, Fig.4.44 に r 方向における TiN, A1050-H の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに圧縮率によらず Tool-2 の方が D_{PS} は大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.45 に θ 方向, Fig.4.46 に r 方向における TiN, C1020-O の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに圧縮率によらず Tool-2 の方が D_{PS} は大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.47 に θ 方向, r 方向における TiN, A1050-H のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに Tool-1, Tool-2 に大きな違いは見られない.

Fig.4.48 に θ 方向, r 方向における TiN, C1020-O のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向では Tool-2 の方が D_{PS} のばらつきが大きくなる傾向が見られる. r 方向では工具表面粗さの影響は見られない.

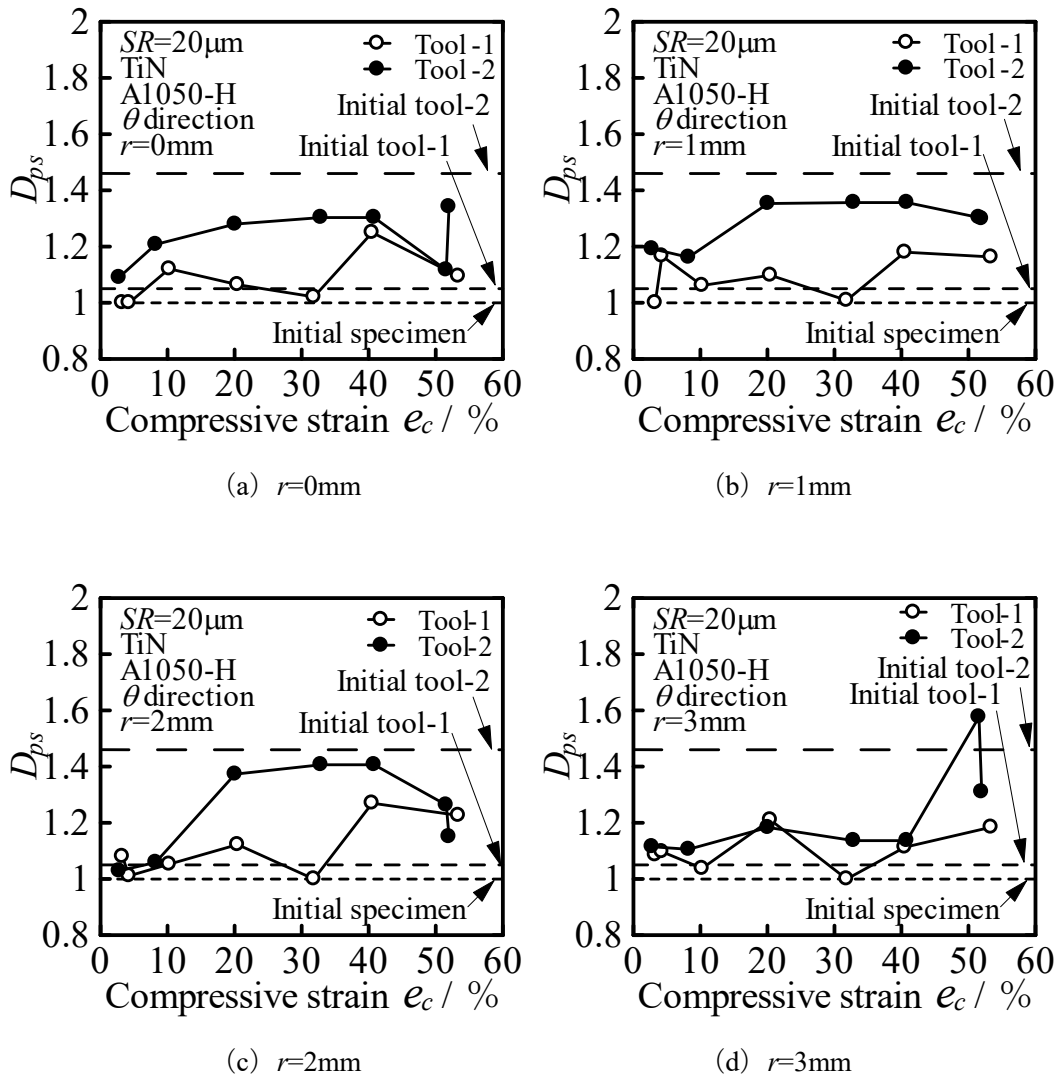


Fig.4.43 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, A1050-H, θ 方向)

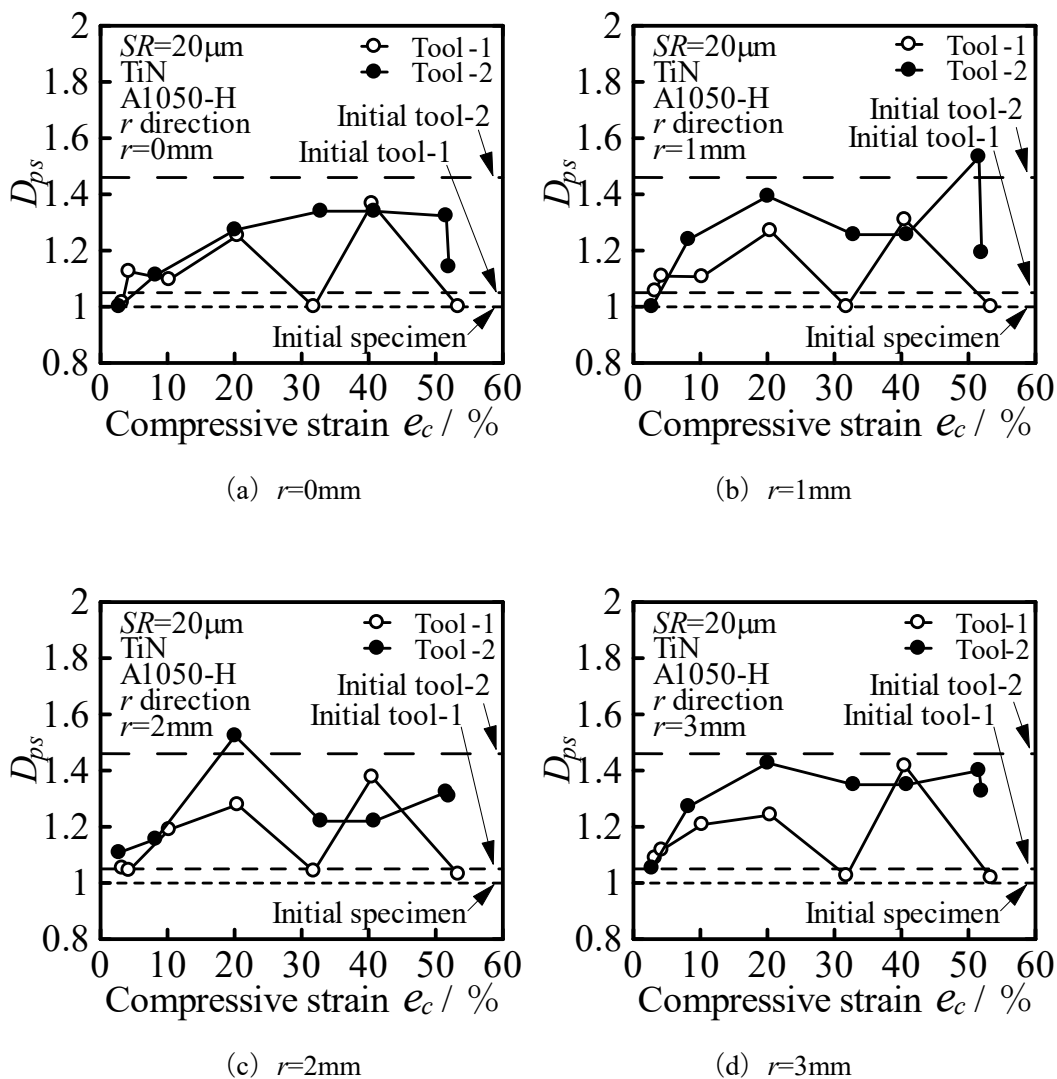


Fig.4.44 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, A1050-H, r 方向)

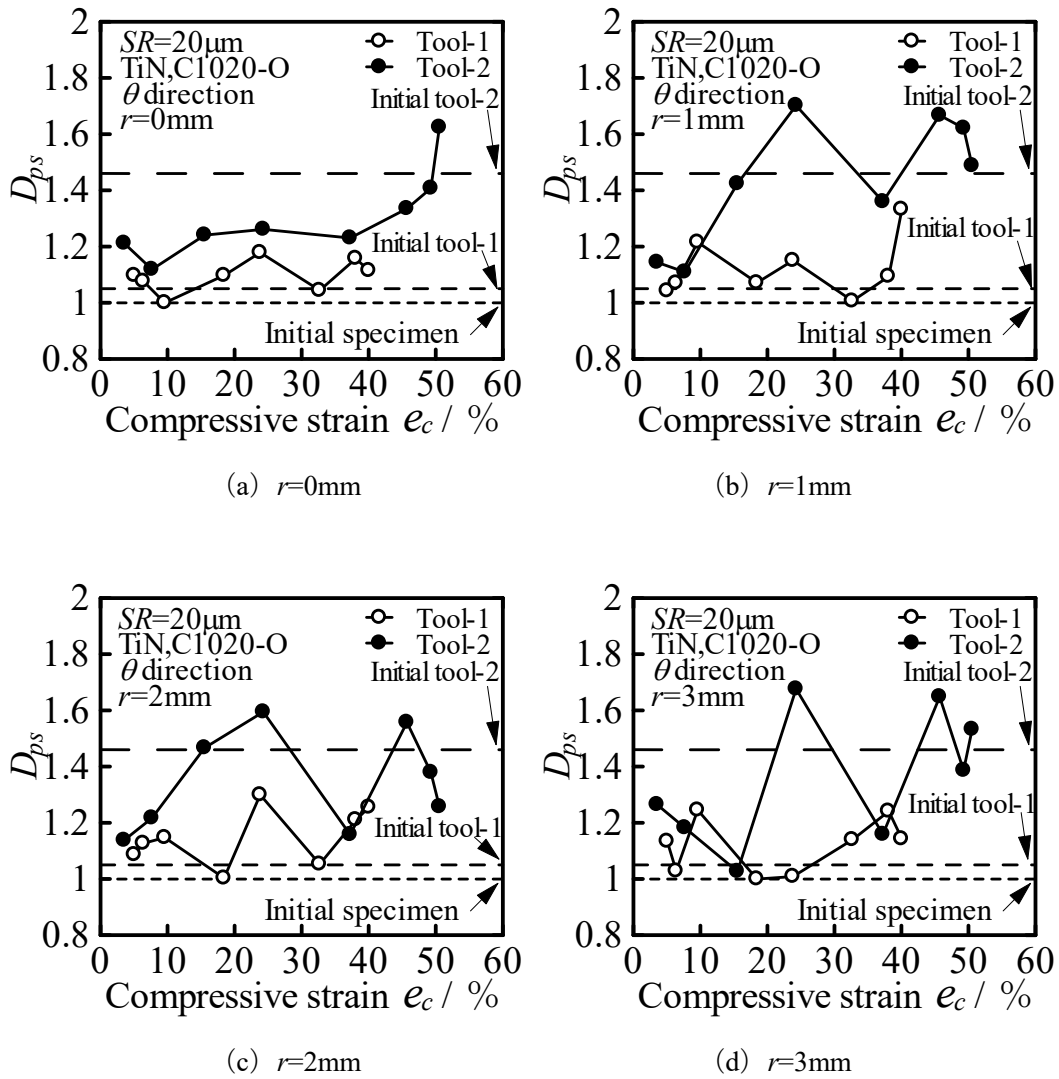


Fig.4.45 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, C1020-O, θ 方向)

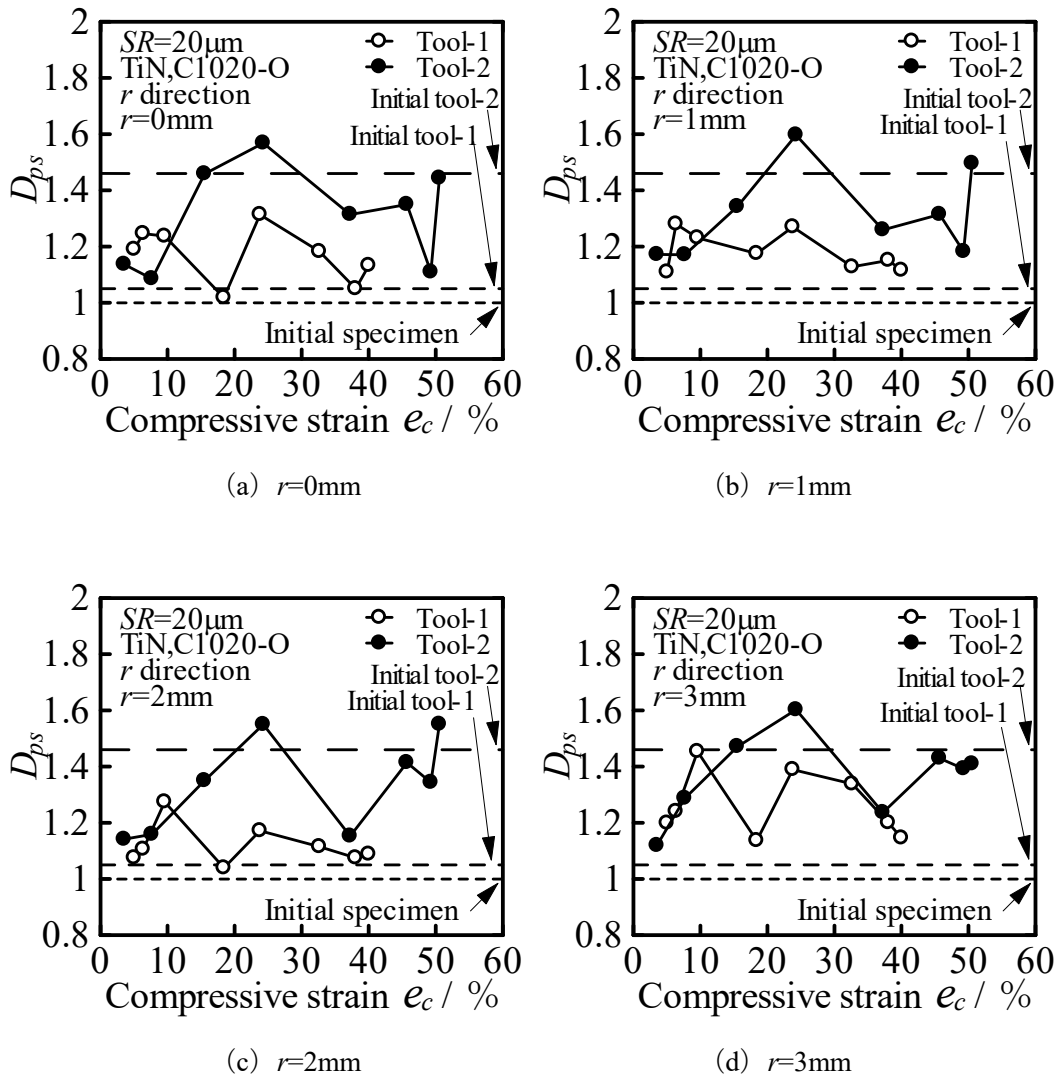


Fig.4.46 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, C1020-O, r 方向)

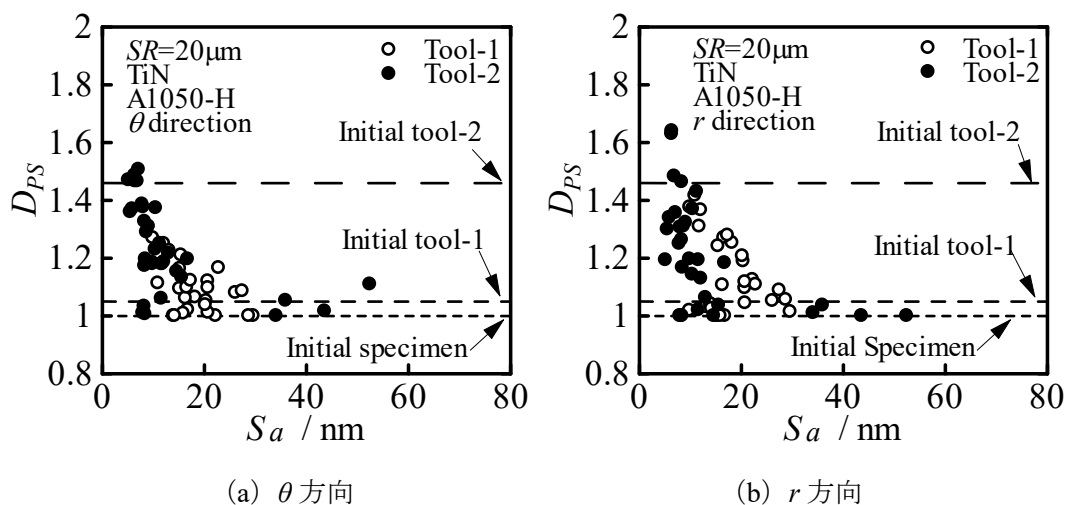


Fig.4.47 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (TiN, A1050-H)

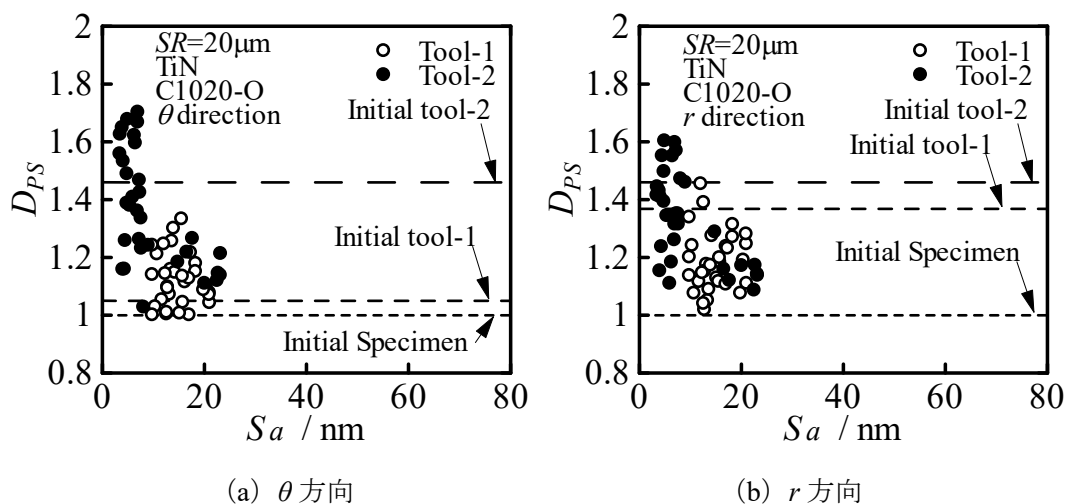


Fig.4.48 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (TiN, C1020-O)

4.9 材料の影響

材料の違いによる平滑化の挙動を調べるため、TiN コーティングを施した Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) において今回行った A1050-H の圧縮試験結果と過去に行った C1020-H の圧縮試験結果⁽²⁴⁾の比較、TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った C1020-O の圧縮試験結果と過去に行った A1050-O の圧縮試験結果⁽²⁵⁾の比較、TiN コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った C1020-O の圧縮試験結果と過去に行った A1050-O の圧縮試験結果⁽²⁵⁾の比較を行う。

4.9.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

Fig.4.49 に TiN, Tool-1, H 材の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。測定箇所によらずアルミニウムの方が D_Z が小さい傾

向が見られる。

Fig.4.50 に TiN, Tool-1, O 材の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの測定箇所においても材料の影響は見られない。

Fig.4.51 に TiN, Tool-2, O 材の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの測定箇所においても銅の方が D_z が小さい傾向が見られる。

Fig.4.52 に各条件の零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。TiN, Tool-1, H 材と TiN, Tool-1, O 材の条件では材料の影響は見られない。TiN, Tool-2, O 材では S_a によらず銅の方が D_z が小さい傾向が見られるが、はっきりとした理由は不明である。

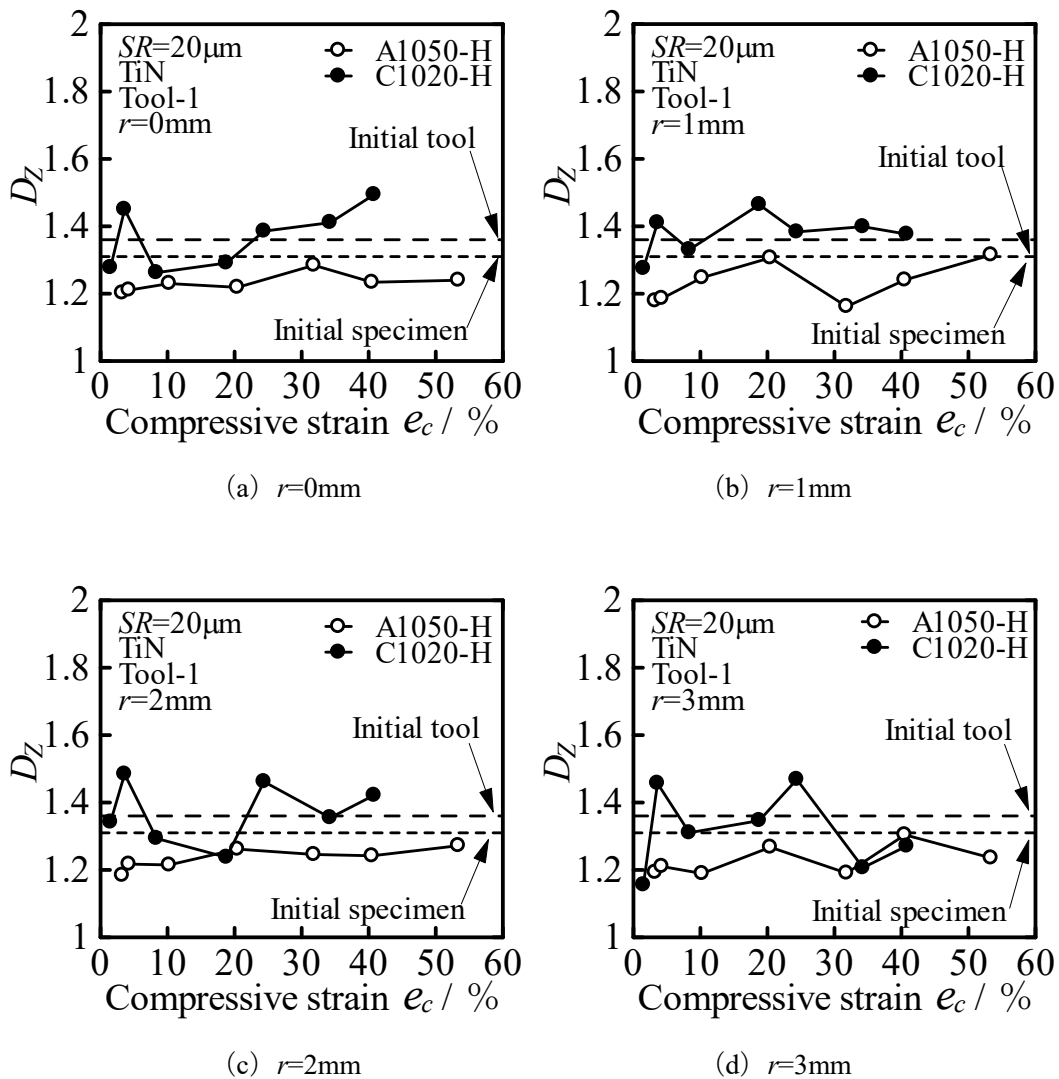


Fig.4.49 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, H 材)

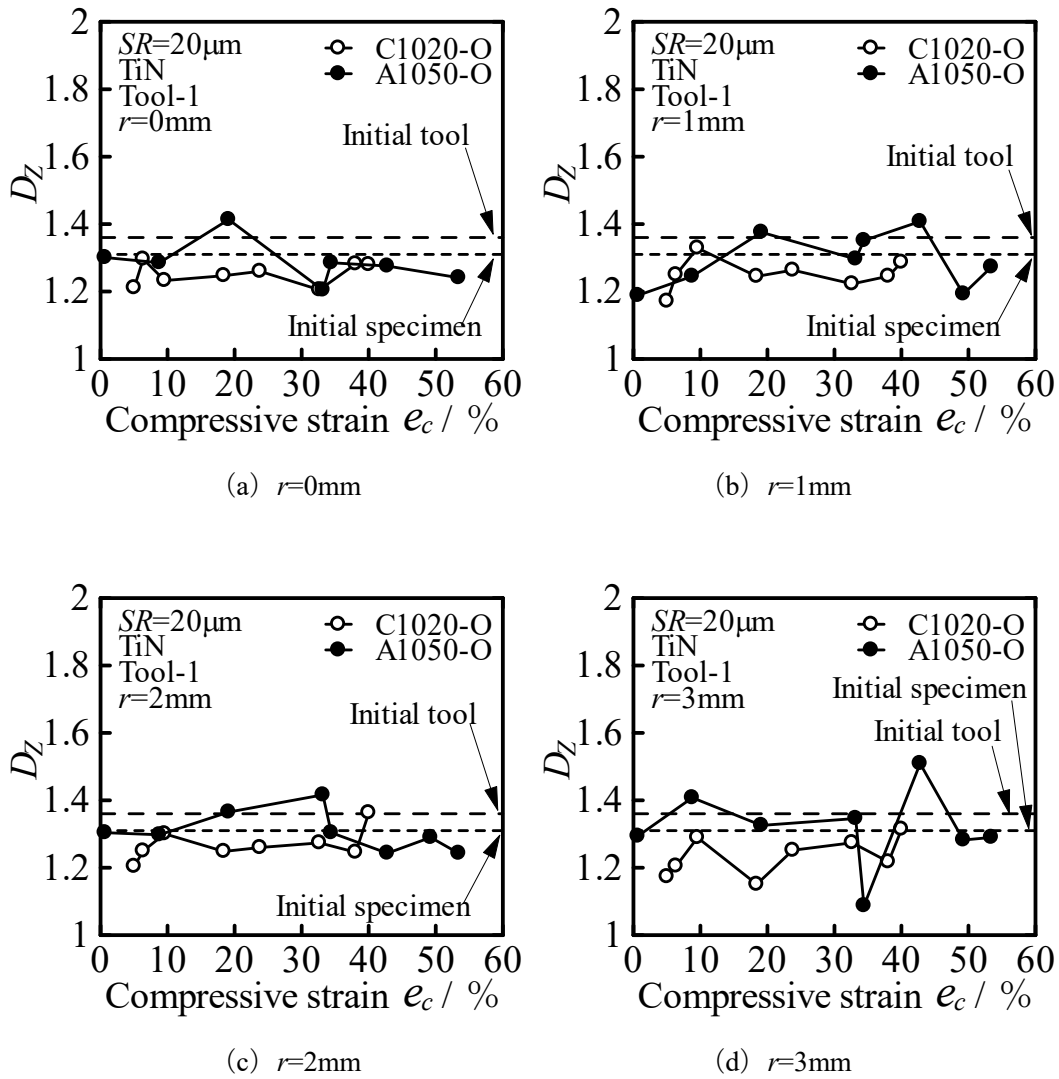


Fig.4.50 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, O材)

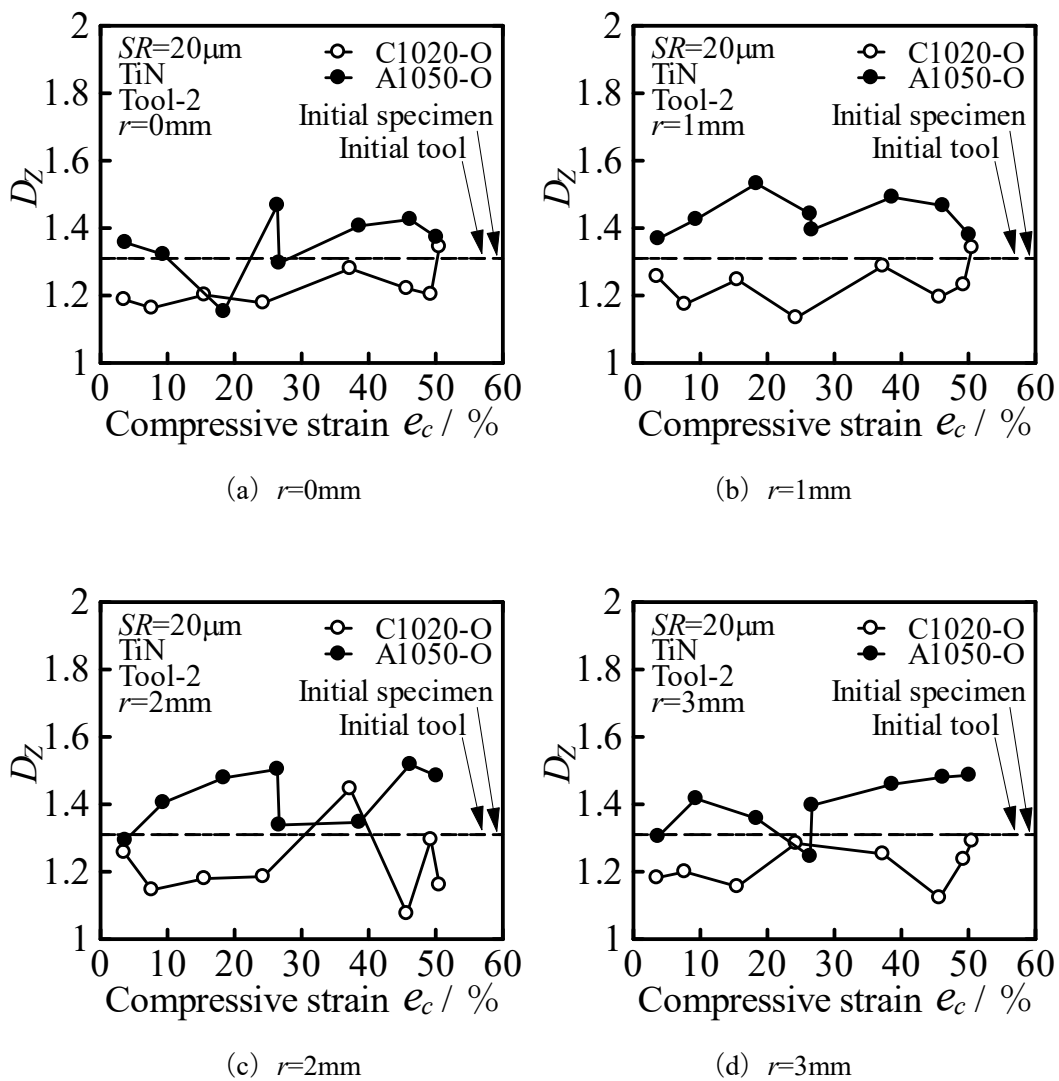


Fig.4.51 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-2, O材)

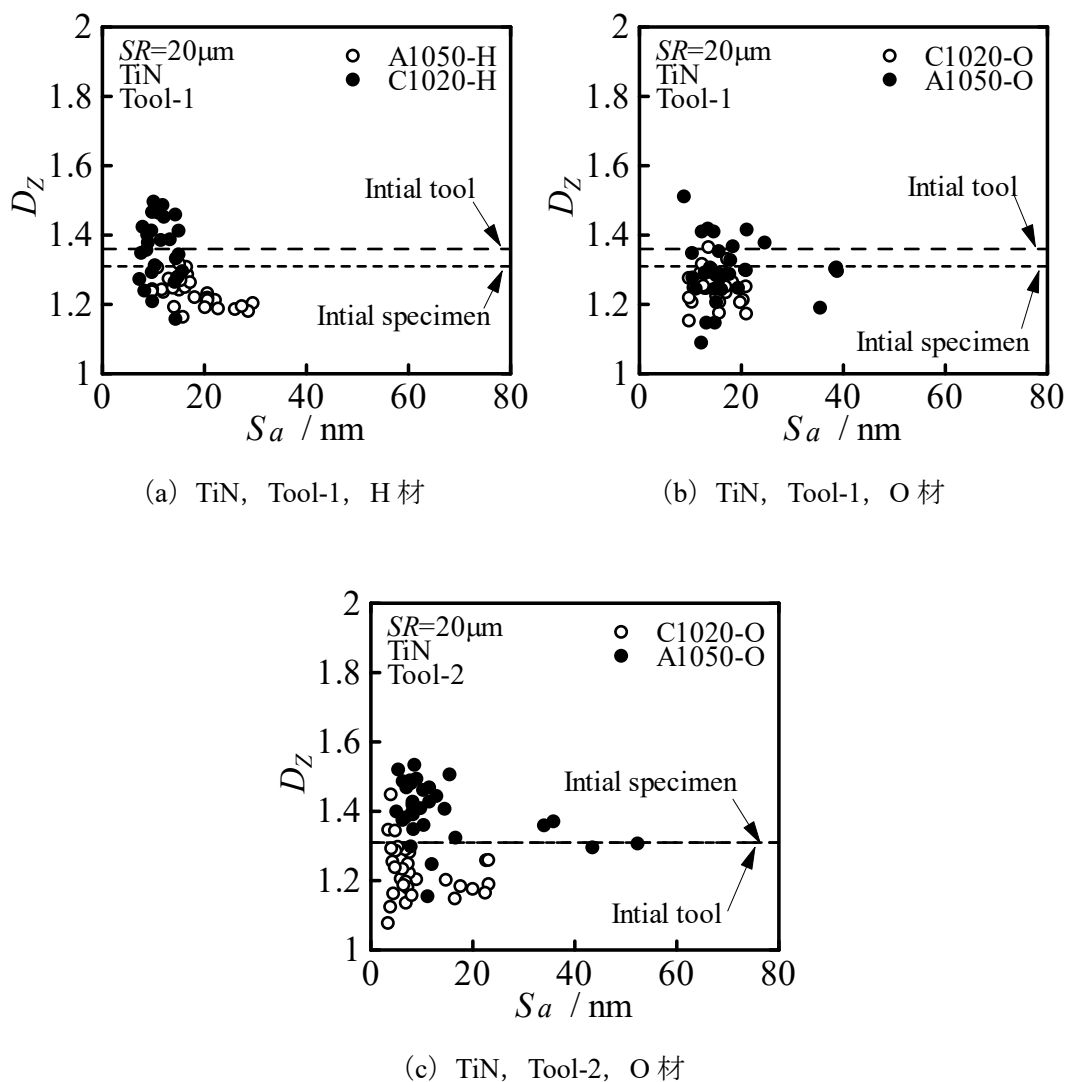


Fig.4.52 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係

4.9.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

Fig.4.53 に θ 方向, Fig.4.54 に r 方向における TiN, Tool-1, H 材の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに, 測定箇所によらず低圧縮率では同程度の D_{PS} となる傾向が見られる. 高圧縮率では, はっきりとした材料による違いは見られない.

Fig.4.55 に θ 方向, Fig.4.56 に r 方向における TiN, Tool-1, O 材の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向では材料による違いは見られない. r 方向では測定箇所によらず, いずれの圧縮率においても銅の方が D_{PS} が大きい傾向が見られる.

Fig.4.57 に θ 方向, Fig.4.58 に r 方向における TiN, Tool-2, O 材の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向, r 方向

ともに、ばらつきが大きくはっきりとした材料による違いは見られない。

Fig.4.59 に θ 方向, r 方向における TiN, Tool-1, H 材のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに材料の影響は見られない。

Fig.4.60 に θ 方向, r 方向における TiN, Tool-1, O 材のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに材料の影響は見られない。

Fig.4.61 に θ 方向, r 方向における TiN, Tool-2, O 材のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向では S_a が小さいとき, 銅の方が D_{PS} のばらつきが大きくなる傾向が見られる. r 方向では材料の影響は見られない。

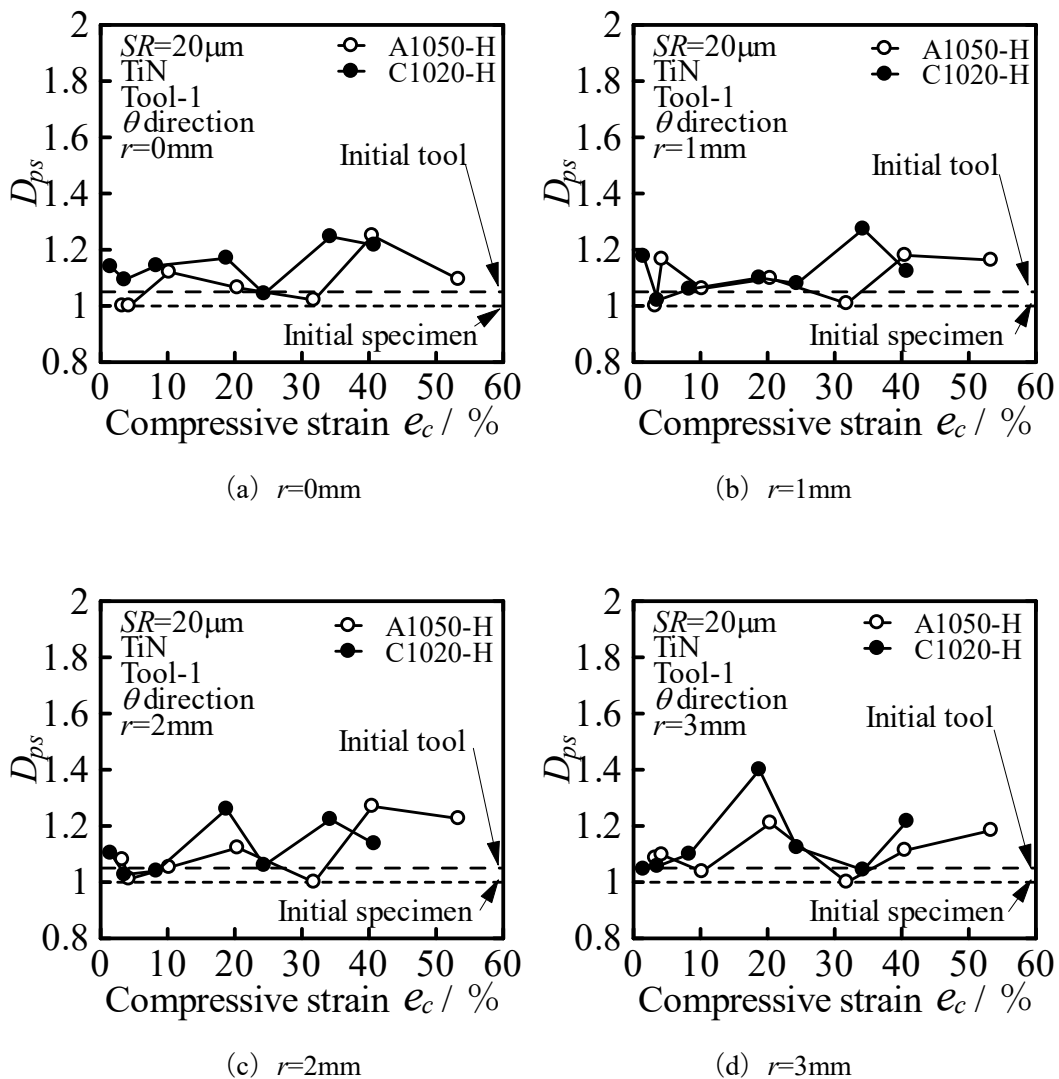


Fig.4.53 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, H 材, θ 方向)

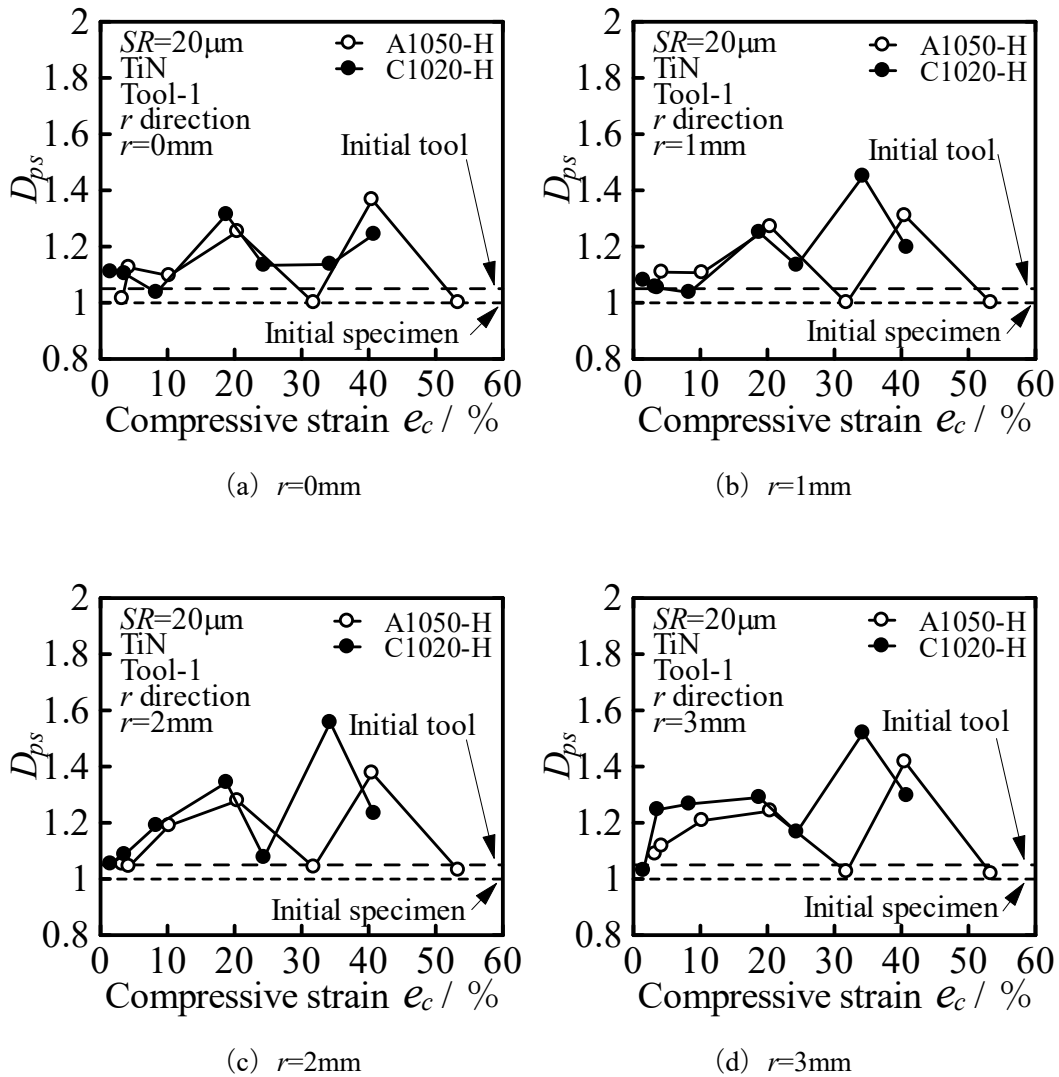


Fig.4.54 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, H材, r 方向)

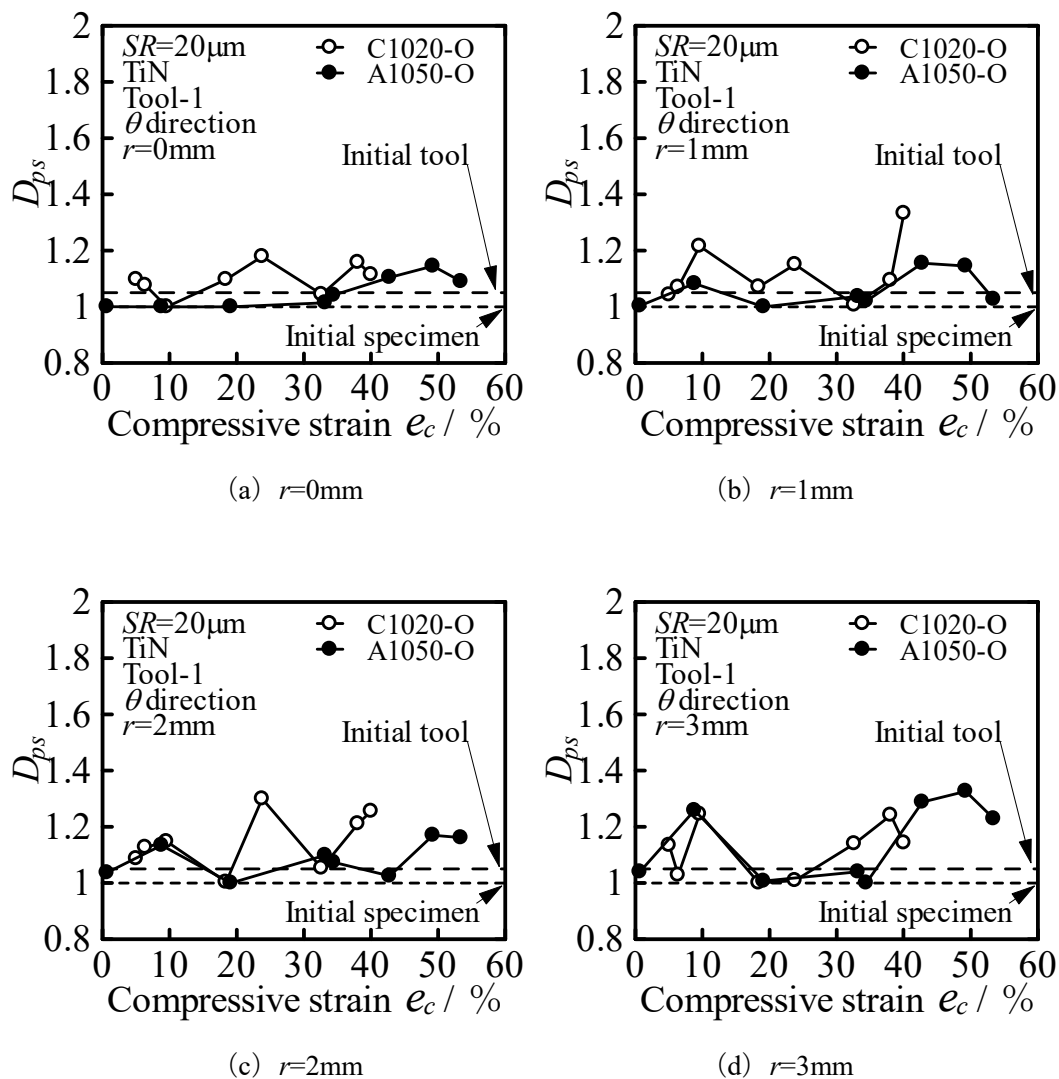


Fig.4.55 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, O材, θ 方向)

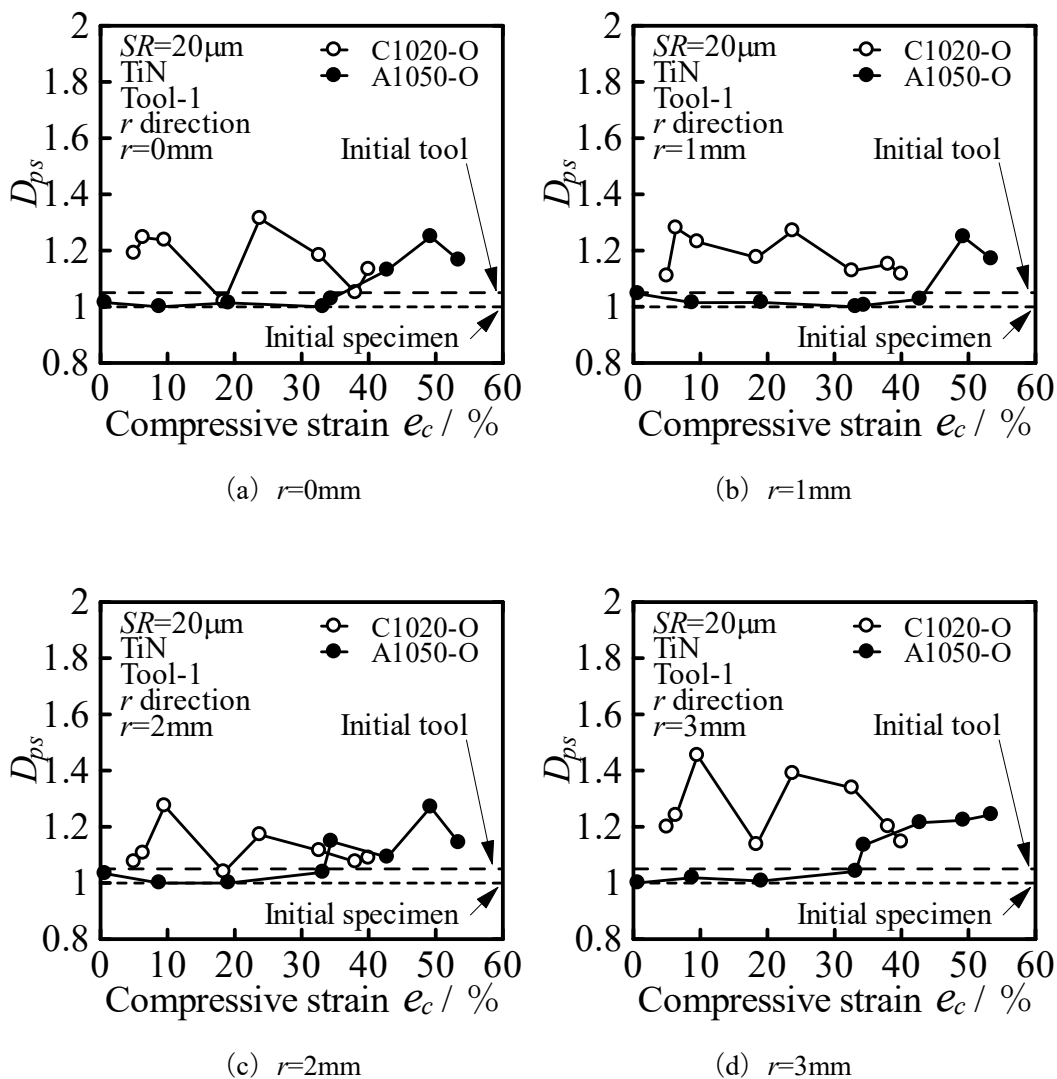


Fig.4.56 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-1, O材, r 方向)

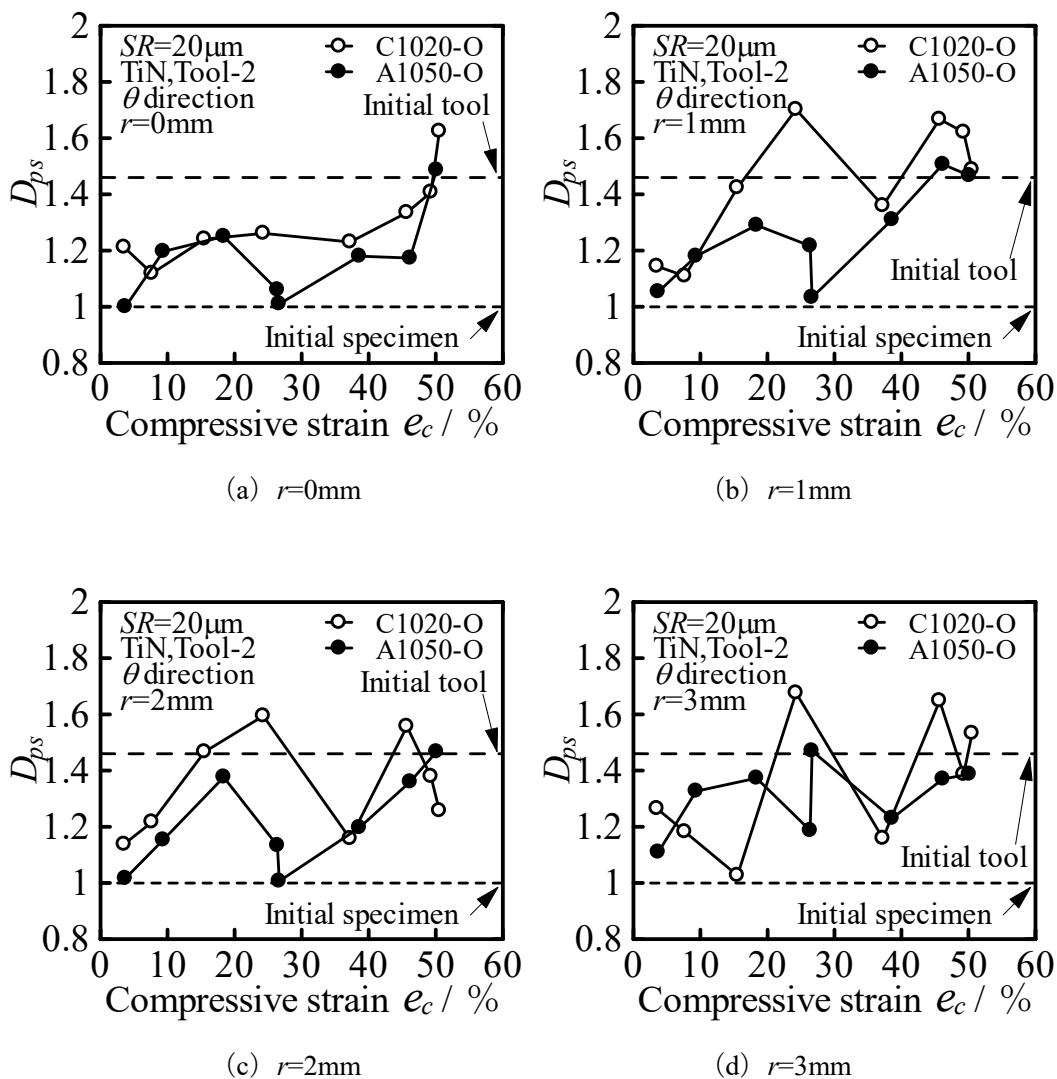


Fig.4.57 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-2, O材, θ 方向)

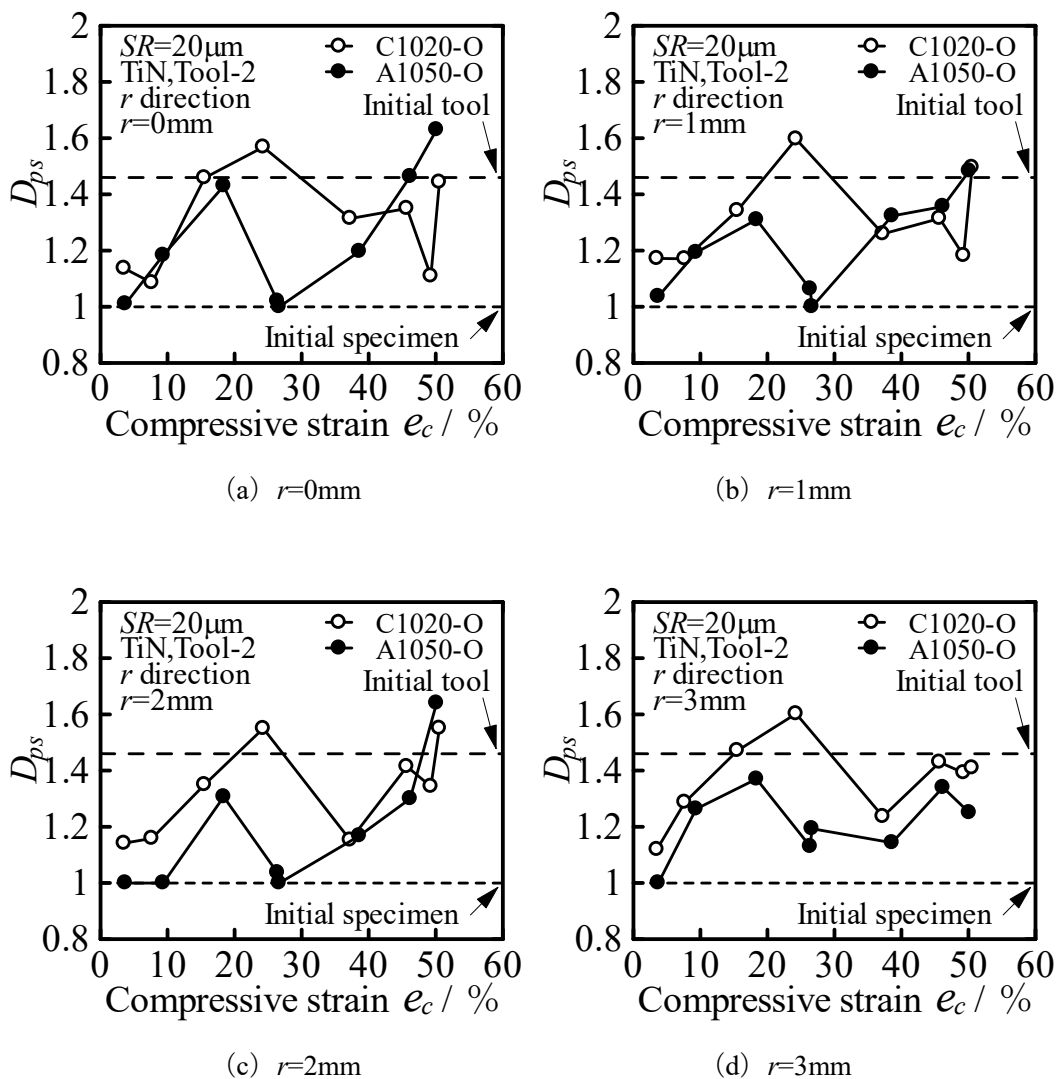


Fig.4.58 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (TiN, Tool-2, O材, r 方向)

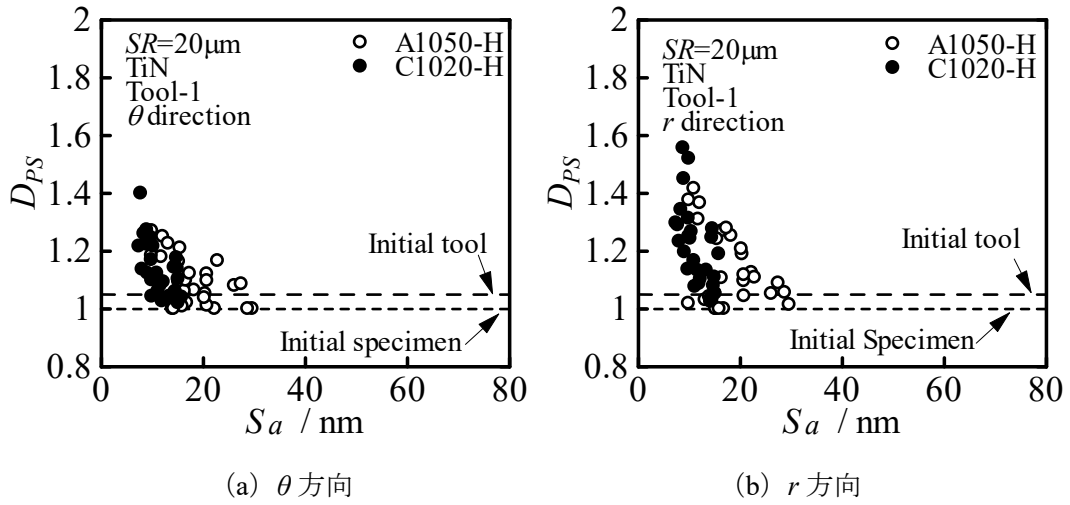


Fig.4.59 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (TiN, Tool-1, H 材)

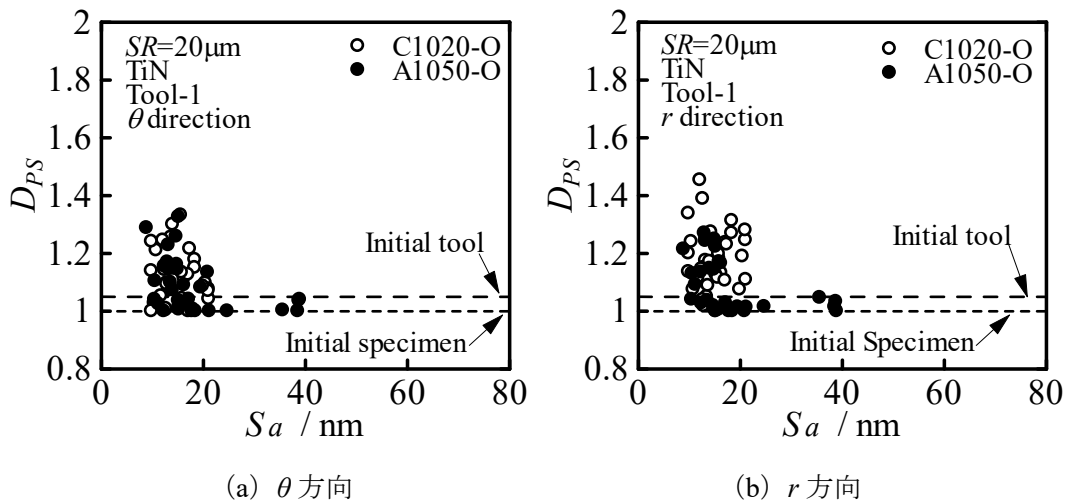


Fig.4.60 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (TiN, Tool-1, O 材)

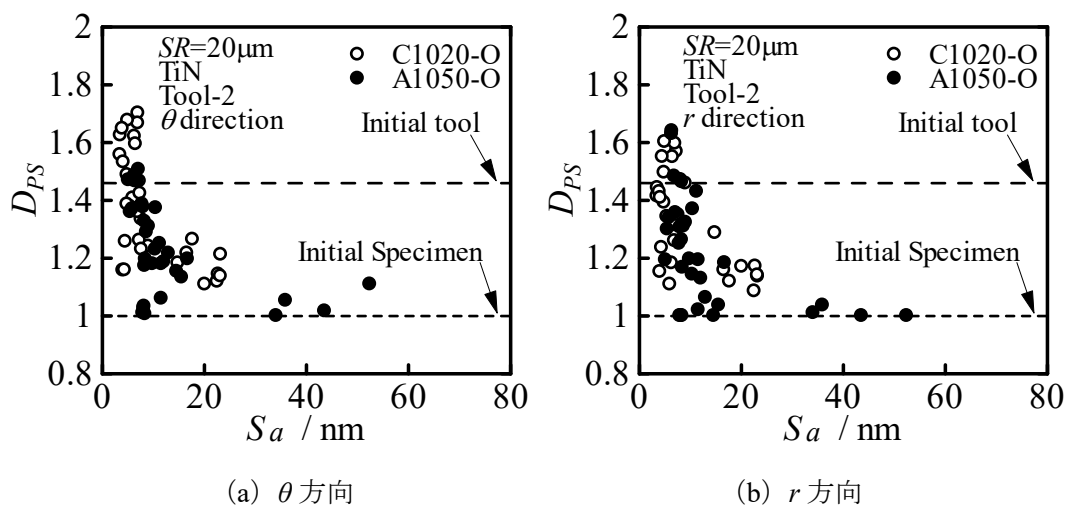


Fig.4.61 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (TiN, Tool-2, O 材)

4.10 工具表面膜種の影響

工具表面膜種の影響を調べるため、今回行った A1050-H における Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) TiN コーティングの圧縮試験結果と過去に行った DLC コーティングの圧縮試験結果⁽²¹⁾の比較、今回行った C1020-O における Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) および Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) TiN コーティングの圧縮試験結果と過去に行った DLC コーティングの圧縮試験結果⁽²³⁾、⁽²⁴⁾の比較を行う。

4.10.1 零点集合次元 D_z による加工品表面の解析結果

Fig.4.62 に Tool-1, A1050-H の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの圧縮率においても圧縮率によらず TiN の方が D_z が小さくなる傾向が見られる。

Fig.4.63 に Tool-1, C1020-O の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの圧縮率においても圧縮率によらず TiN の方が D_z が小さくなる傾向が見られる。

Fig.4.64 に Tool-2, C1020-O の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとの零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの圧縮率においても圧縮率によらず TiN の方が D_z が小さくなる傾向が見られる。

Fig.4.65 に各条件での零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。いずれの条件においても S_a によらず TiN の方が D_z が小さくなる傾向が見られる。これは過去に行った研究⁽²⁴⁾、⁽²⁵⁾の TiN と DLC の比較においても一部見られた傾向であり、工具表面膜種の違いによる影響が表れていると考えられる。DLC-A と DLC-B の比較を行った過去の研究⁽²¹⁾では、DLC-B の方が DLC-A よりも D_z が小さくなる傾向が見られている。そこで、今回の結果との対比を行うと、摩擦係数の違いは矛盾し、硬度の違いは一致していることが得られた。これより、工具表面膜種の硬度が低いと D_z が小さくなるという可能性が考えられるが、比較

対象が少なくはっきりとした原因は不明であり、さらに別の工具表面膜種による実験を行う必要がある。

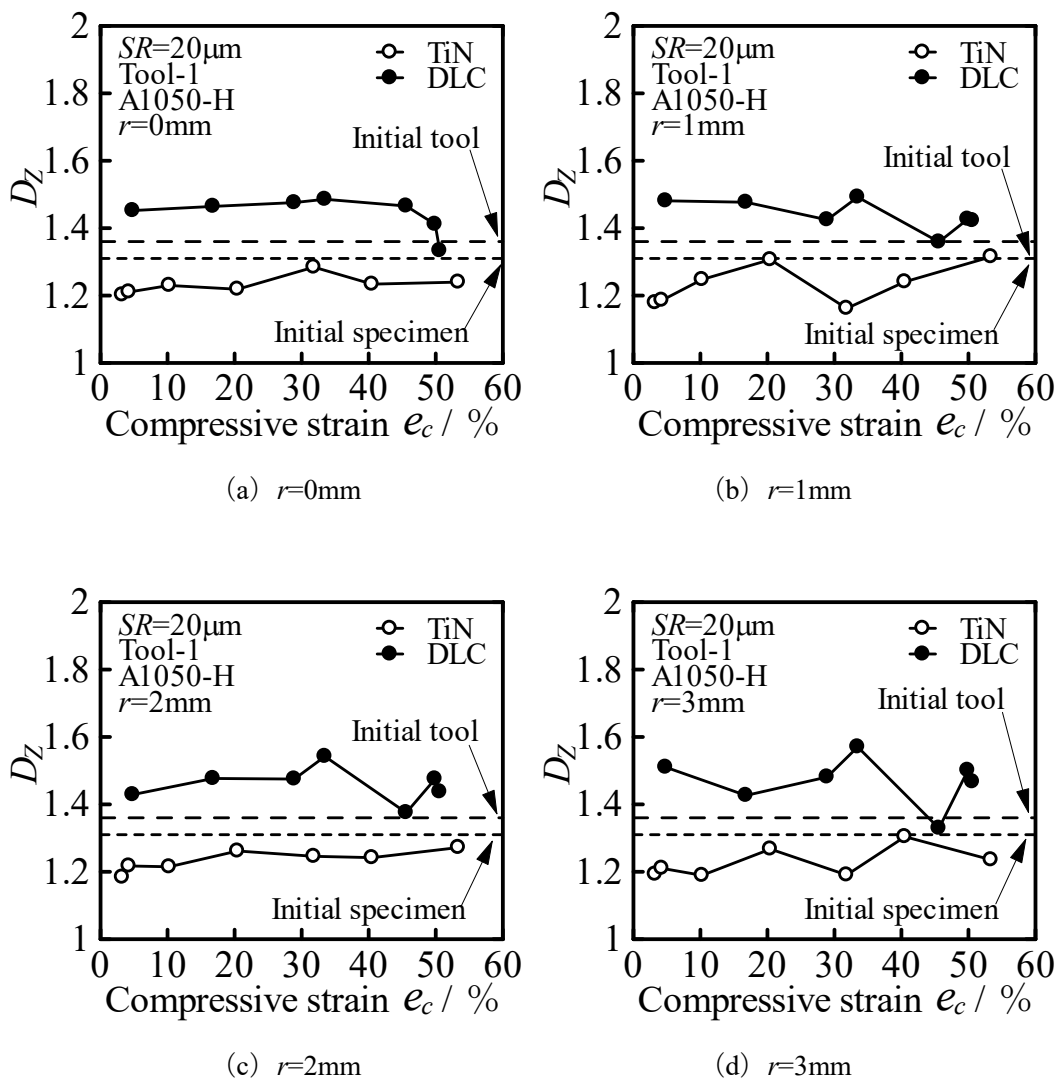


Fig.4.62 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H)

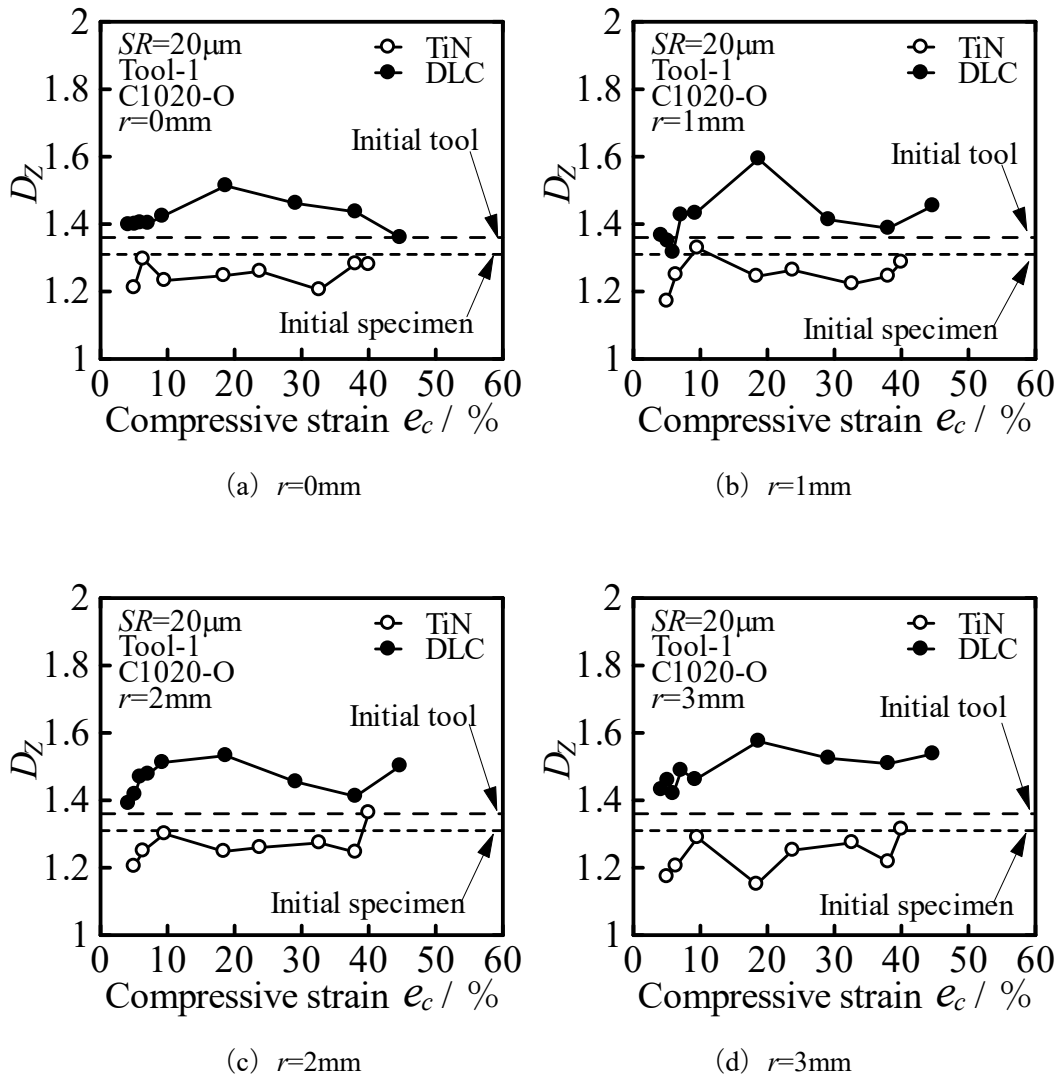


Fig.4.63 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, C1020-O)

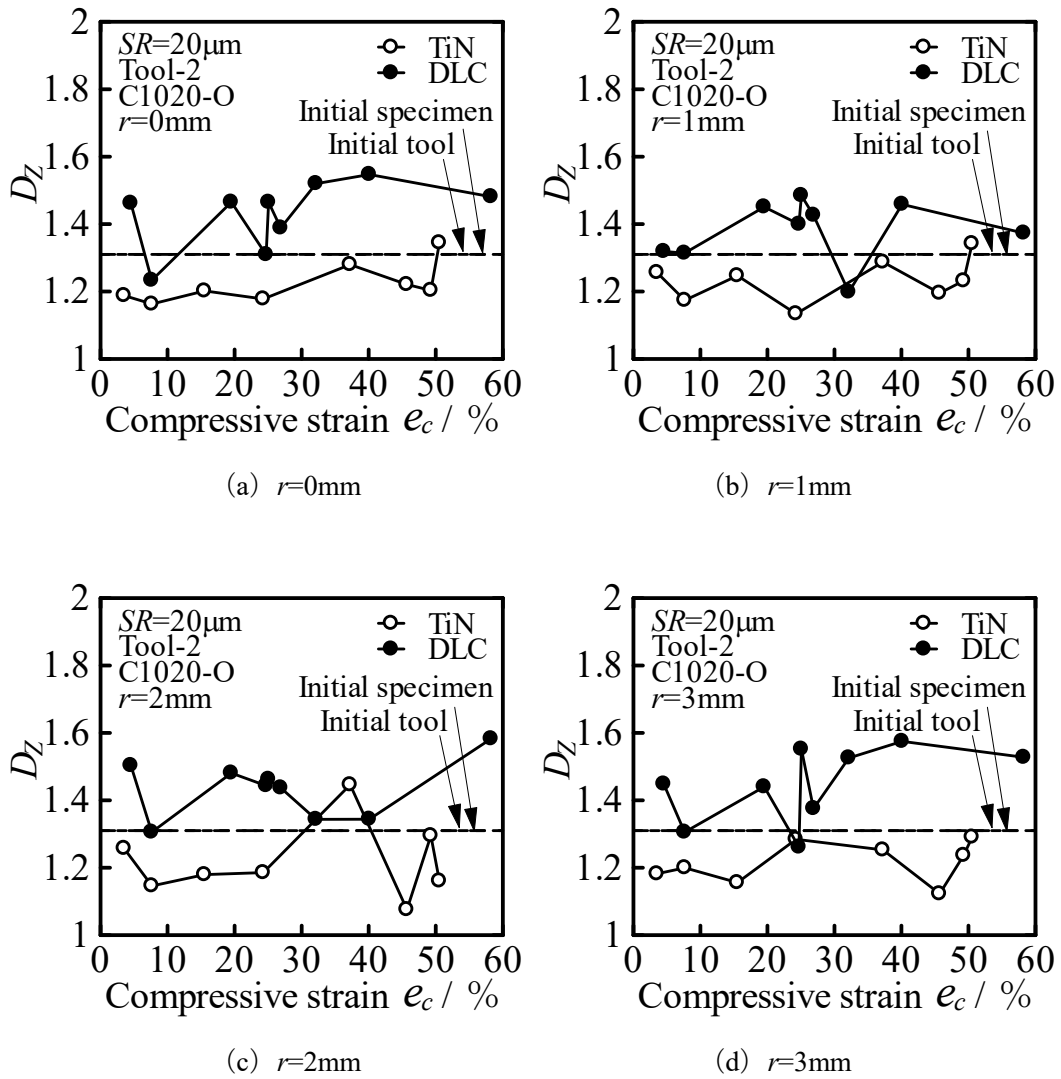


Fig.4.64 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, C1020-O)

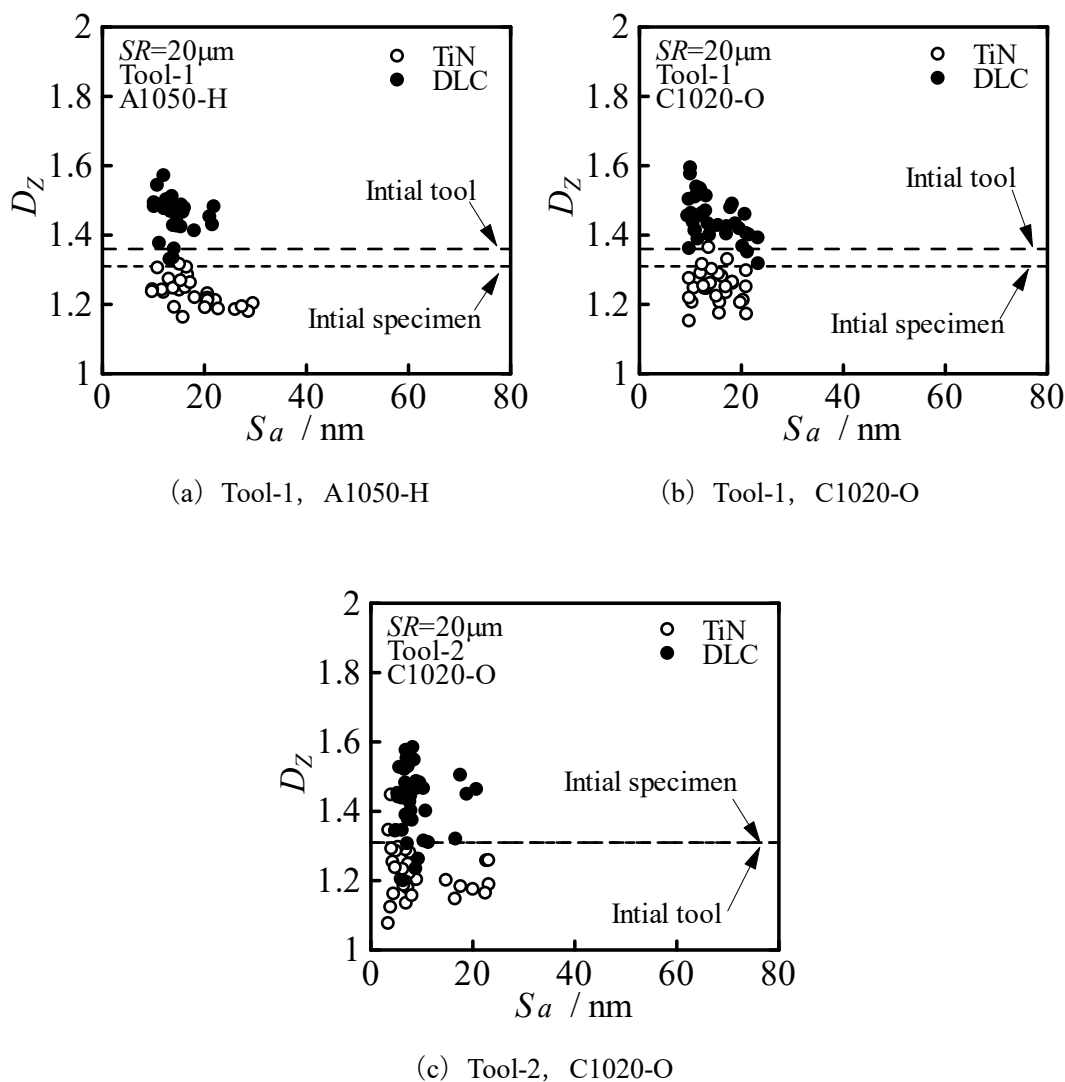


Fig.4.65 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係

4.10.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

Fig.4.66 に θ 方向, Fig.4.67 に r 方向における Tool-1, A1050-H の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向では, いずれの測定箇所においても圧縮率によらず TiN の方が D_{PS} が小さい傾向が見られる. r 方向では, はっきりとした工具表面膜種の違いは見られない.

Fig.4.68 に θ 方向, Fig.4.69 に r 方向における Tool-1, C1020-O の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向では低圧縮率においては工具表面膜種による違いは見られず, 高圧縮率では TiN の方が D_{PS} が小さい傾向が見られる. r 方向ではばらつきが大きくはっきりとした工具表面膜種の影響は見られない.

Fig.4.70 に θ 方向, Fig.4.71 に r 方向における Tool-2, C1020-O の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$,

$r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ ごとのパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す。 θ 方向, r 方向ともにばらつきが大きくはっきりとした工具表面膜種の影響は見られない。

Fig.4.72 に θ 方向, r 方向における Tool-1, A1050-H のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。はっきりとした工具表面膜種の影響は見られない。

Fig.4.73 に θ 方向, r 方向における Tool-1, C1020-O のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。 θ 方向では, はっきりとした工具表面膜種の影響は見られない。 r 方向では S_a が小さいときは, はっきりとした工具表面膜種の影響は見られないが, S_a が大きいときは TiN の方が D_{PS} が大きくなる傾向が見られる。

Fig.4.74 に θ 方向, r 方向における Tool-2, C1020-O のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。はっきりとした工具表面膜種の影響は見られない。

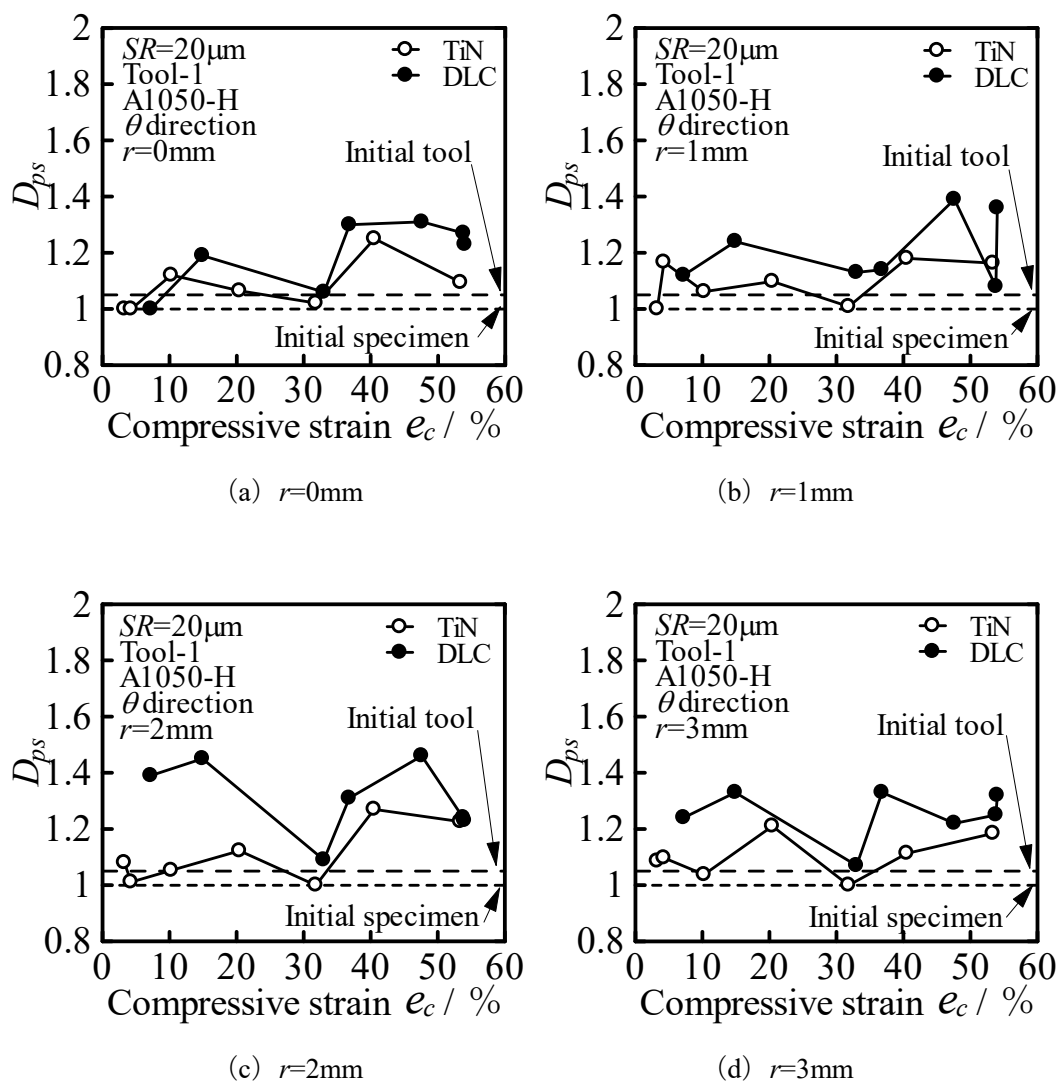


Fig.4.66 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H, θ 方向)

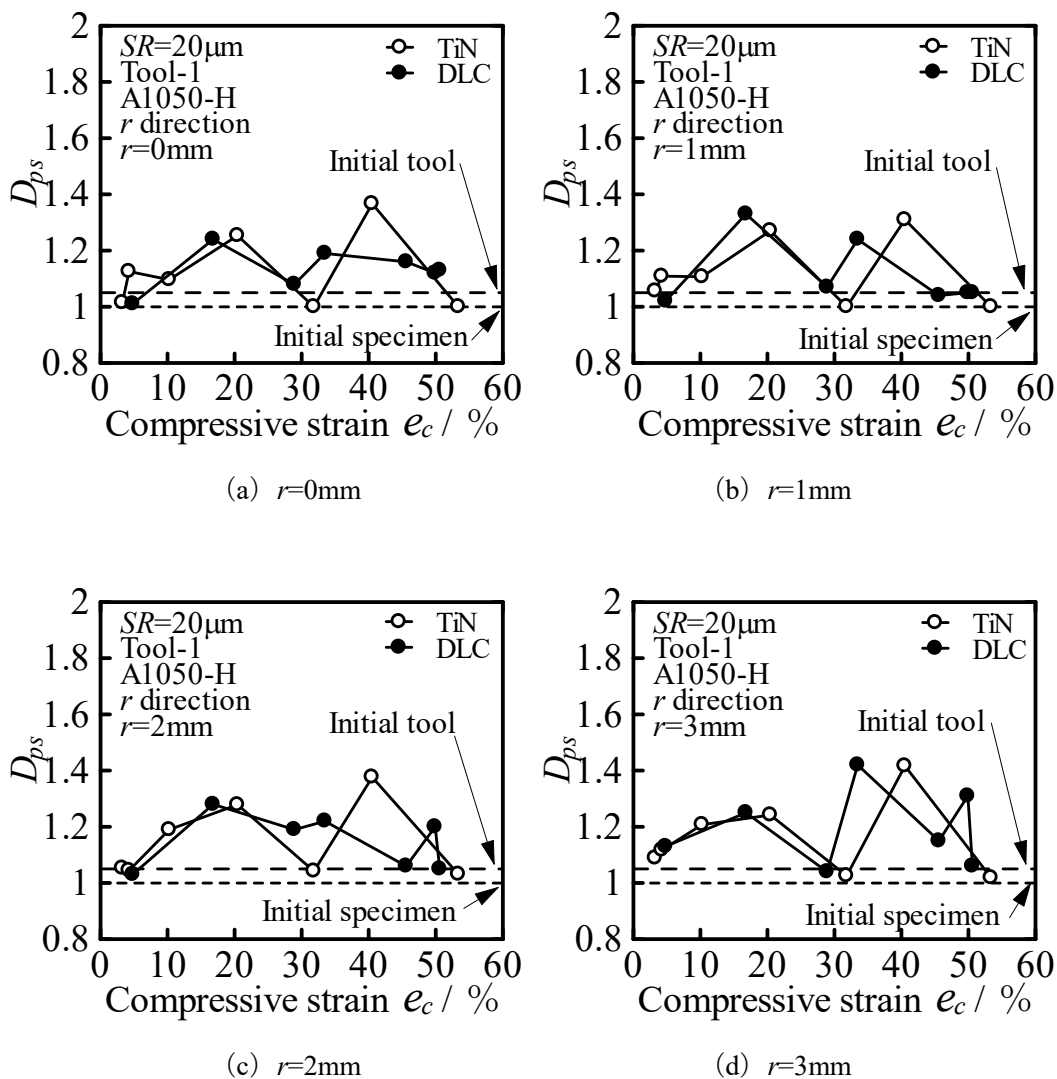


Fig.4.67 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H, r 方向)

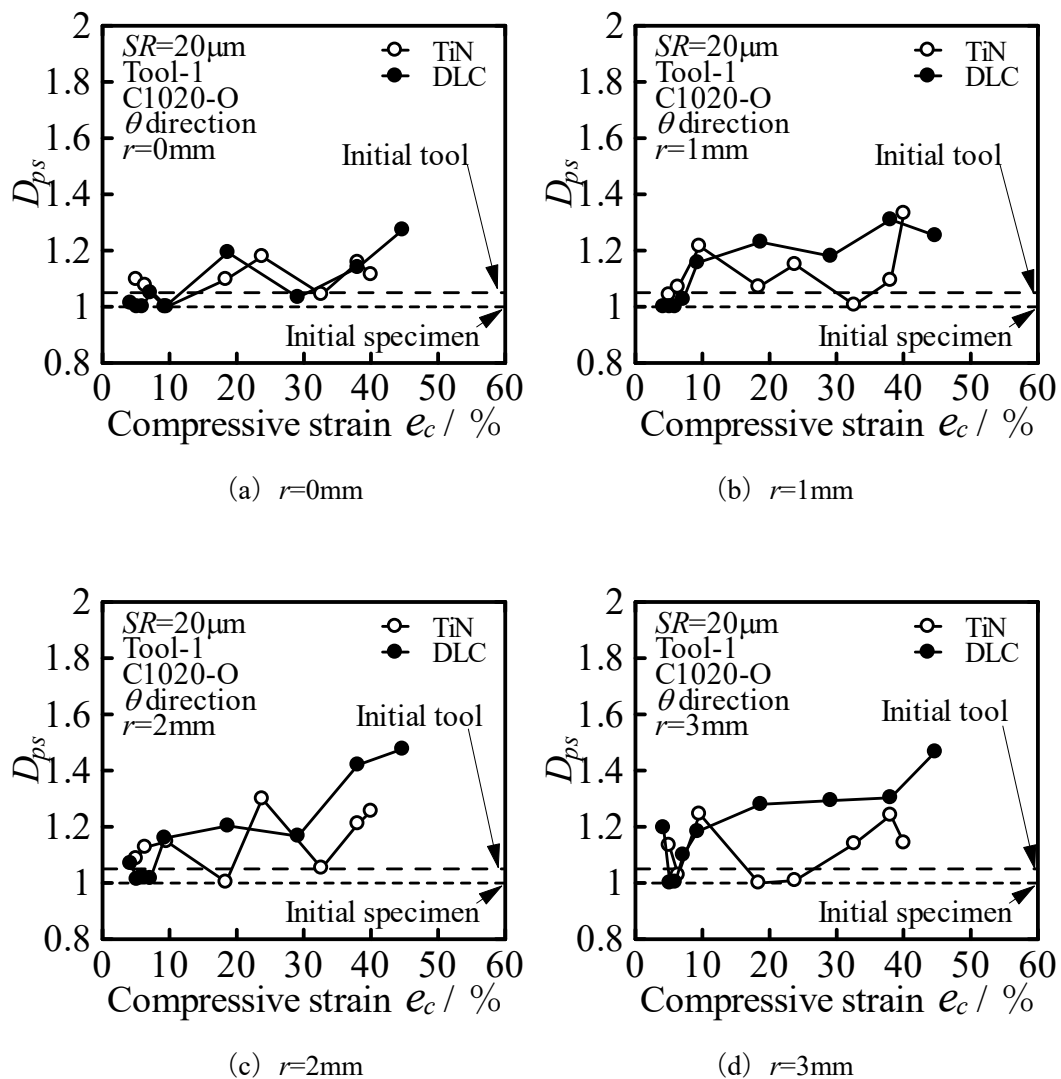


Fig.4.68 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, C1020-O, θ 方向)

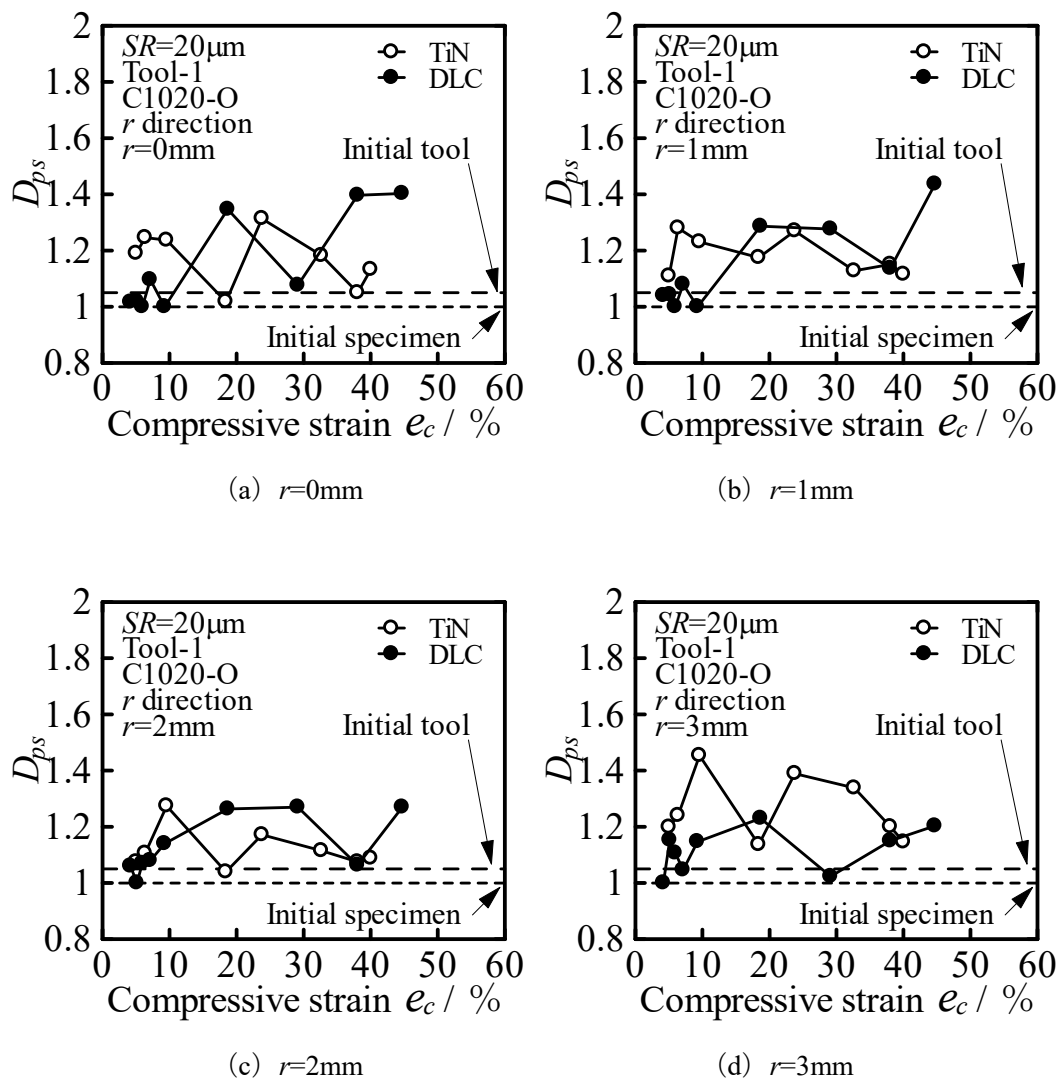


Fig.4.69 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, C1020-O, r 方向)

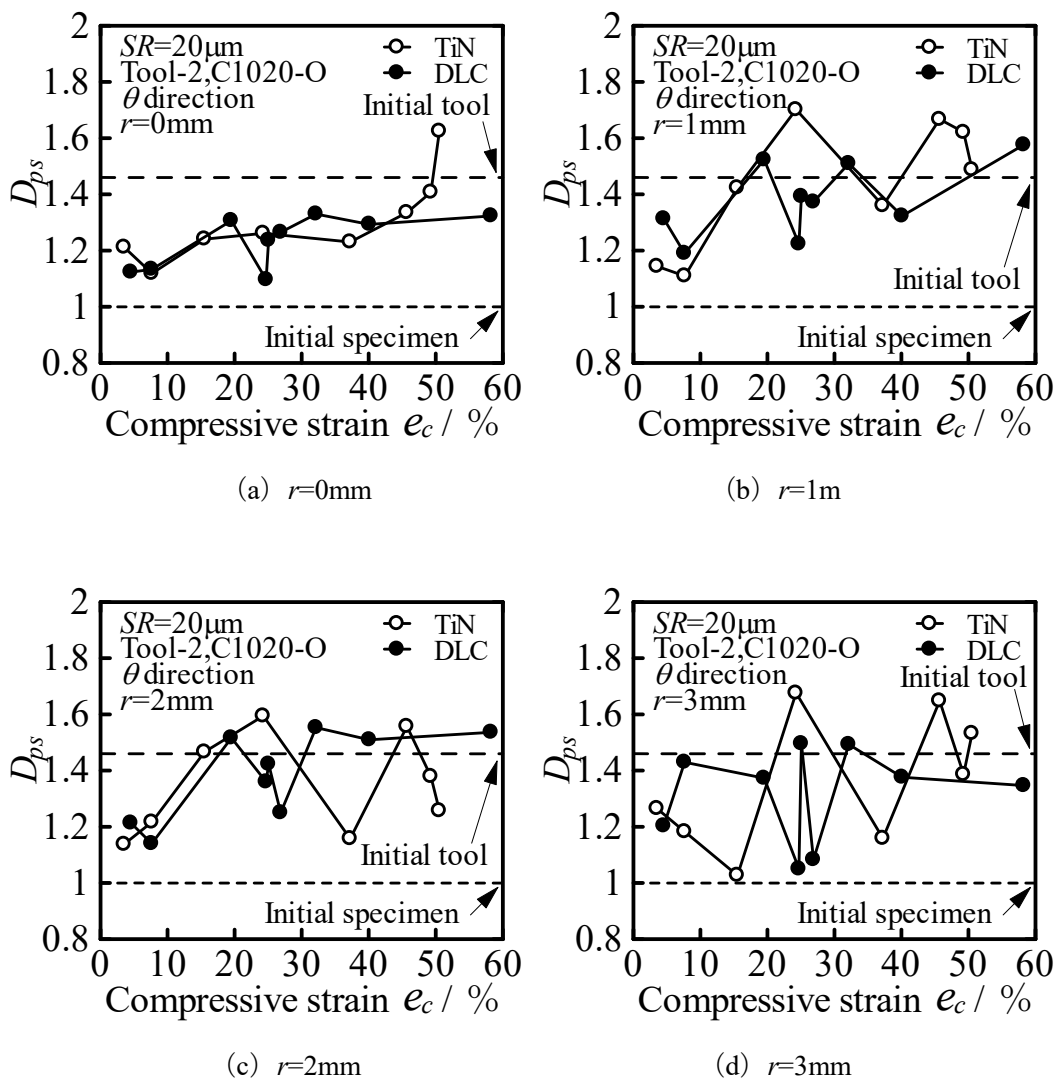


Fig.4.70 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, C1020-O, θ 方向)

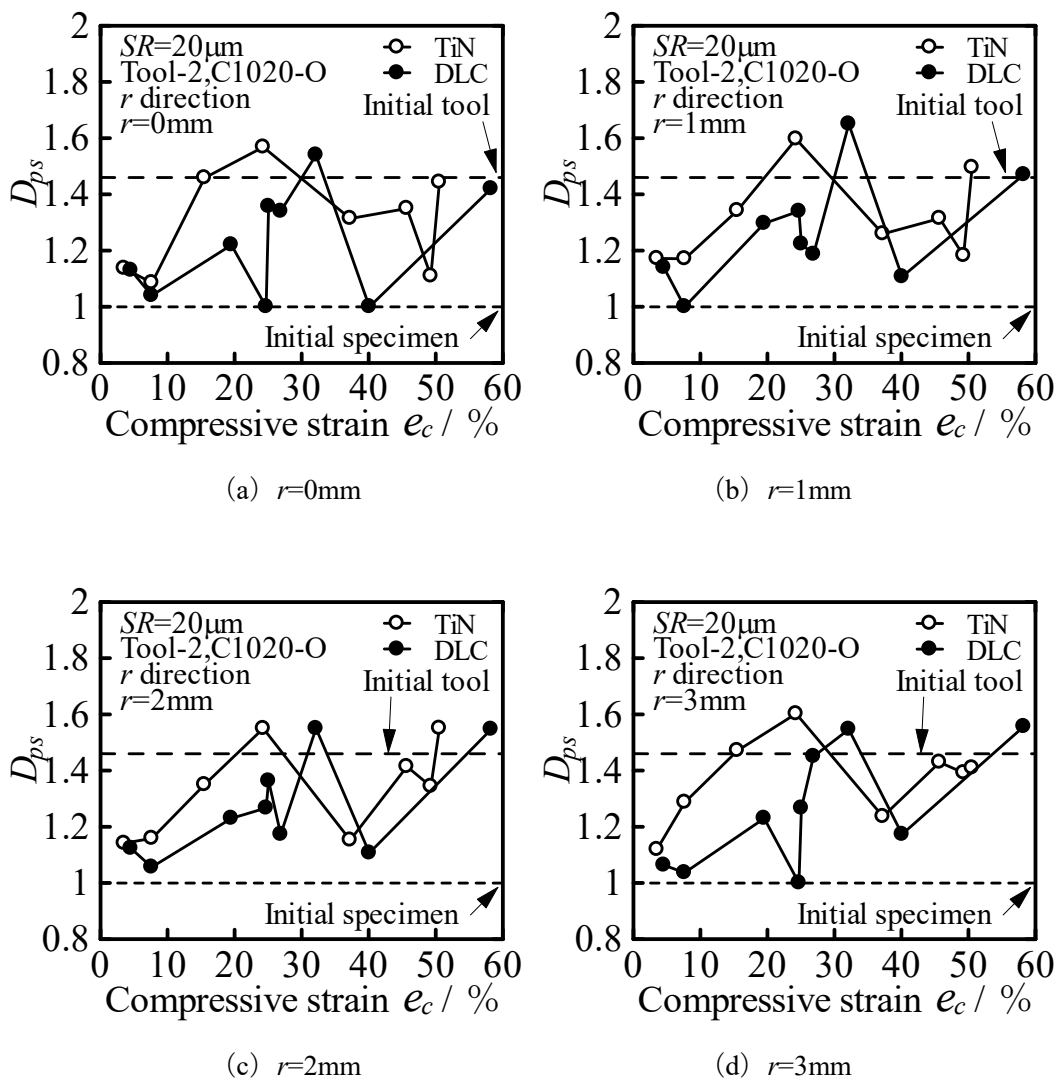
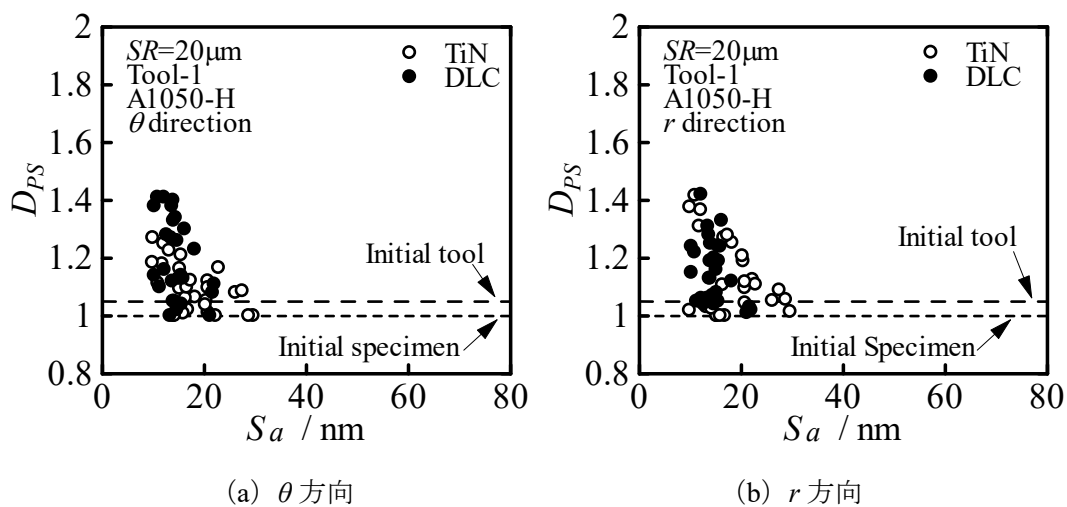
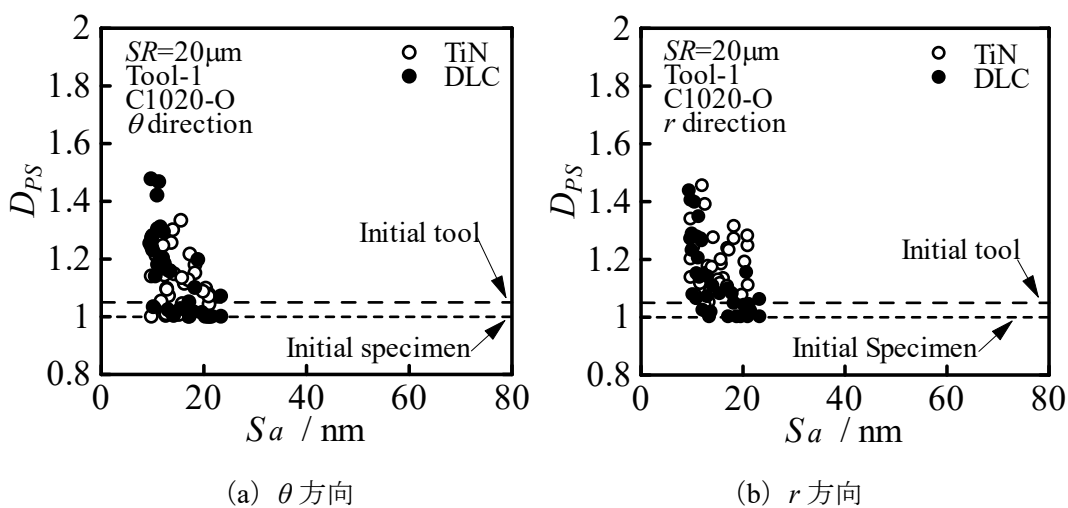


Fig.4.71 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, C1020-O, r 方向)

Fig.4.72 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-1, A1050-H)Fig.4.73 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-1, C1020-O)

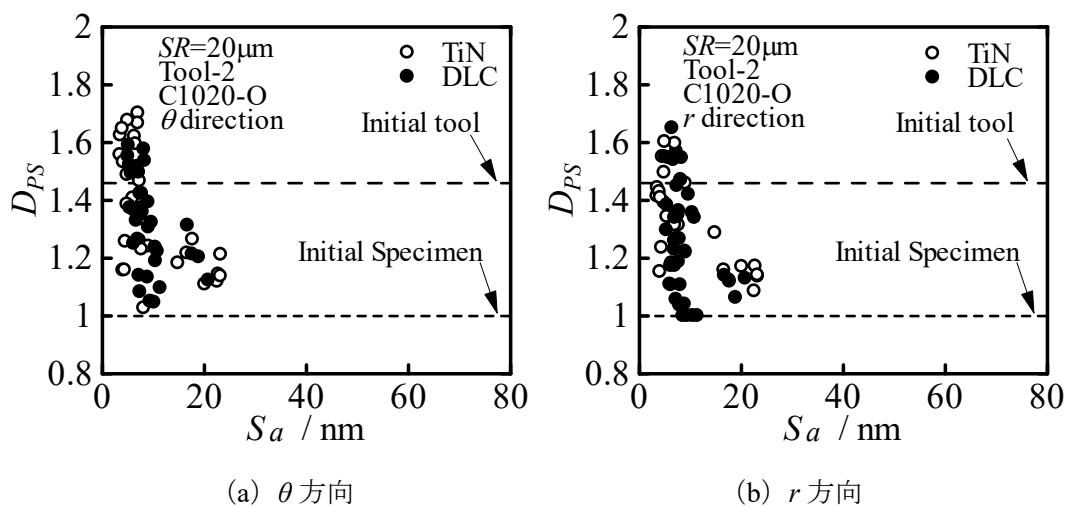


Fig.4.74 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-2, C1020-O)

以上、本章の結果より、工具表面膜種の硬度が高いと零点集合次元 D_Z が小さくなる傾向があることがわかったが、はっきりとした理由は不明である。加工硬化、工具表面粗さ、材料の違いによる D_Z の影響はよくわからなかった。パワースペクトル次元 D_{PS} は加工硬化、工具表面粗さ、材料、工具表面膜種の違いによる影響はよくわからなかった。また、測定方向による違いは見られず、 S_a が小さいと D_{PS} が大きくなる傾向が見られた。

第5章 結論

本研究では、ナノレベルでの金属の塑性加工技術を開発することを目的とし、単軸圧縮加工による超平滑面創成挙動について検討を行った。本研究では、アルミニウム引き抜き材 (A1050-H) について、 $R_a=10\text{nm}$ (Tool-1) の工具表面に潤滑剤として TiN (Titanium Nitride) コーティングを施した工具を用いて圧縮加工を行い、これまでに行ったアルミニウム焼きなまし材 (A1050-O) の結果と比較することで加工硬化の影響、 $R_a=5\text{nm}$ (Tool-2) の結果と比較することで工具表面粗さの影響、銅引き抜き材 (C1020-H) の結果と比較することで材料の影響、DLC (Diamond Like Carbon) コーティングの結果と比較することで工具表面膜種の影響を検討した。また、銅焼きなまし材 (C1020-O) について、 $R_a=10\text{nm}$ (Tool-1)、 $R_a=5\text{nm}$ (Tool-2) の工具表面に潤滑剤として TiN コーティングを施した工具を用いて圧縮試験を行い、これまでに行った銅引き抜き材 (C1020-H) の結果と比較することで加工硬化の影響、両者の結果を比較することで工具表面粗さの影響、アルミニウム焼きなまし材 (A1050-O) の結果と比較することで材料の影響、これまでに行った DLC コーティングの結果と比較することで工具表面膜種の影響についても検討した。触針式表面粗さ計・原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察、有限要素法 (FEM) 解析による変形シミュレーションを行い検討した。また、試験片表面の凹凸形状を複雑さという観点から評価し、超平滑面の創成挙動を検討するために、零点集合次元 D_z 、パワースペクトル次元 D_{PS} を求め、ナノフラクタル構造についても調べた。

以下に本研究によって得られた結果を示す。

- (1) TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$)、A1050-H の場合、圧縮率が大きくなるにつれて平滑化される傾向が見られるが、圧縮率 40%までは圧縮率が大きくなるにつれて平滑化が進む。いずれの圧縮率においても測定箇所による大きな平滑度の違いは見られない。
- (2) TiN コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$)、C1020-O の場合、圧縮率が大きくなると若干平滑化が進むが大きな違いは見られない。中心部よりも外周部の方がより平滑化が進む。
- (3) TiN コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$)、C1020-O の場合、圧縮率 15%程度までは圧縮率が大きくなると平滑化が進み、それ以降では大きな違いは見られない。中心部よりも外周部の方がより平滑化が進む。
- (4) 加工硬化の影響について、アルミニウムでは H 材と O 材に大きな差は見られない。銅では低圧縮率において H 材の方が平滑化が進む傾向が見られる。これは H 材の方が変形抵抗が大きいため、面圧による転写効果によって平滑化がより進んだものと考えられる。
- (5) 工具表面粗さの影響について、いずれの条件においても工具表面粗さの小さい Tool-2

の方が Tool-1 よりも平滑化される傾向がある。また, Tool-1 では初期工具表面粗さ程度まで平滑化が進むが, Tool-2 では初期工具表面粗さ程度まで平滑化が進まない。

- (6) 材料の影響について, H 材では圧縮率によらず銅の方が平滑化が進む。O 材では低圧縮率で銅の方が平滑化が進む傾向が見られる。これは銅の方が変形抵抗が大きいためだと考えられるが, はっきりとした理由はわからない。
- (7) 工具表面膜種の影響について, A1050-H では, 低圧縮率の外周部において DLC の方が平滑化が進む傾向が見られる。C1020-O では, 中心部で DLC の方が平滑化が進む傾向が見られる。これは硬度の高い DLC の方が面圧による転写効果によって平滑化がより進んだものと考えられる。
- (8) フラクタル解析を行った結果, 零点集合次元 D_z は, TiN の方が DLC よりも小さくなる傾向が見られた。その他の条件ではばらつきが大きく, 加工硬化, 工具表面粗さ, 材料, 工具表面膜種のはっきりとした影響は見られなかった。パワースペクトル次元 D_{PS} は, いずれの条件でもばらつきが大きく, 加工硬化, 工具表面粗さ, 材料, 工具表面膜種のはっきりとした影響は見られなかった。また, 測定方向による大きな違いは見られず, S_a が小さい範囲においては D_{PS} が大きくなる傾向が見られた。

[参考文献]

- (1) 太田稔：表面機能向上のための表面改質・仕上げ技術の展望，精密工学会誌，81 巻，12 号（2015），1049-1052.
- (2) 中村保，近藤一義，西ヶ谷知栄：塑性加工における表面平滑化条件，日本機械学会論文集（C 編），56 巻，530 号（1990），268-275.
- (3) 池浩：塑性加工の表面損傷と微細表面形状の加工に関する研究，塑性と加工，46 巻，539 号，（2005），1116-1120.
- (4) H.B. Xie, Z.Y.Jiang, W.Y.D.Yuen : Analysis of friction and surface roughness effects on edge crack evolution of thin strip during cold rolling, TRIBOLOGY INTERNATIONAL, Vol. 44, No. 9 (2011), 971-979.
- (5) H.J. Li, Z.Y. Jiang, D.B. Wei, J.T. Han, A.K. Tieu : Study on surface asperity flattening during uniaxial planar compression, Wear, Vol. 271, No. 9-10 (2011), 1778-1784.
- (6) H.J. Li, Z.Y. Jiang, D.B. Wei, X.Zhang : Microtexture based analysis of surface asperity flattening behavior of annealed aluminum alloy in uniaxial planar compression , TRIBOLOGY INTERNATIONAL, Vol. 66, (2013), 282-288.
- (7) H.J. Li, Z.Y. Jiang, D.B. Wei, X.Gao : Influence of Friction on Surface Asperity Flattening Process in Cold Uniaxial Planar Compression (CUPC) , TRIBOLOGY LETTERS, Vol. 53, No. 2 (2014) , 383-393.
- (8) 日暮栄治，山本道貴，西村隆太郎，松前貴司，倉島優一，高木秀樹，須賀唯知，伊藤寿浩：テンプレートストリッピングによる接合面平滑化に関する研究，第 30 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム，（2020），143-146.
- (9) 仙波卓弥，天本祥文，角谷均：超硬合金製マイクロレンズアレイ金型の研削加工（多結晶ダイヤモンド製研削工具と金型の表面粗さ），日本機械学会論文集，第 87 巻，901 号（2021），21-00216.
- (10) M. Okada, S. Terada, Y. Kataoka, T. Kihara, T. Miura, M. Otsu : Burnishing characteristics of sliding burnishing process with active rotary tool targeting stainless steel, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 15, No. 4 (2021) , 20-00439.
- (11) Y. Zheng, A. E. L. Cumont, M. Bai, Y. Liang, J. Liu, J. Wei, X. Zhang, H. Ye, C. Li : Smoothing of single crystal diamond by high-speed three-dimensional dynamic friction polishing: Optimization and surface bonds evolution mechanism, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol. 96, (2021), 105472.
- (12) C. Li, Y. Piao, B. Meng, Y. Hu, L. Li, F. Zhang : Phase transition and plastic deformation mechanisms induced by self-rotating grinding of GaN single crystals, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 172, (2022), 103827.
- (13) 服部清一：超精密鍛造品のナノ表面特性に関する研究，平成 14 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），（2002）.

- (14)大野哲平：金属の塑性加工による超平滑面の創成，平成 16 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2004).
- (15)井川恵里：金属の圧縮加工における平滑化挙動，平成 17 年度 卒業論文（三重大学大学院工学研究科），(2005).
- (16)山口勝也：金属の単軸圧縮加工による超平滑面創成，平成 19 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2007).
- (17)小川広祐：単軸圧縮加工による超平滑面創成に関する研究，平成 21 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2009).
- (18)赤塚幸平：圧縮加工による超平滑面の創成に関する研究，平成 22 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2010).
- (19)宮本達馬：単軸圧縮加工による超平滑面創成における工具表面膜の影響，平成 25 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2013).
- (20)脇圭希：圧縮加工によるアルミニウムの圧縮加工による超平滑面創成，平成 23 年度 卒業論文（三重大学工学部），(2013).
- (21)関悠太郎：単軸圧縮加工によるアルミニウムの超平滑化に関する検討，平成 27 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2015).
- (22)岩崎達洋：圧縮加工における工具表面状態と超平滑化の関係，平成 29 年度 卒業論文（三重大学工学部），(2016).
- (23)上江洲由悟：単軸圧縮加工による銅の超平滑化条件，平成 30 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2018).
- (24)松原涼太：圧縮加工による銅表面の超平滑化条件，令和 2 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2020).
- (25)鷺一輝：単軸圧縮加工による超平滑化と工具表面状態の関係，令和元年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2019).
- (26)上江洲由悟：単軸圧縮加工による銅の超平滑化条件，平成 30 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2018)，3-7.
- (27)脇圭希：圧縮加工によるアルミニウム表面の超平滑化，平成 25 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2013)，3-6.
- (28)脇圭希：圧縮加工によるアルミニウム表面の超平滑化，平成 25 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2013)，6-17.
- (29)脇圭希：圧縮加工によるアルミニウム表面の超平滑化，平成 25 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2013)，23-24.
- (30)鷺一輝：単軸圧縮加工による超平滑化と工具表面状態の関係，令和元年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2019)，13-17.
- (31)脇圭希：圧縮加工によるアルミニウム表面の超平滑化，平成 25 年度 修士論文（三重大学大学院工学研究科），(2013)，24-27.

- (32)島津製作所：走査型プローブ顕微鏡 SPM-9500 シリーズ 本体取扱説明書, 8-11.
- (33)脇圭希：圧縮加工によるアルミニウム表面の超平滑化, 平成 25 年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2013), 27-32.
- (34)脇圭希：圧縮加工によるアルミニウム表面の超平滑化, 平成 25 年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2013), 32-34.
- (35)B. B. Mandelbrot : The Fractal Geometry of Nature, (1982), 4-5.
- (36)高安秀樹：フラクタル, 朝倉書店, (1986), 1-18.
- (37)ハインツ・オットー・パイトゲン, ディートマーザウペ(山口昌哉監訳)：フラクタル・イメージ, シュプリンガー・フェアラーク東京, (1990), 39-40.
- (38)黒崎靖, 松井正仁：塑性加工表面問題へのフラクタル手法の適用, 塑性と加工, 40 巻, 462 号(1999-7), 635-639.

謝辞

本研究の遂行および論文作成にあたり、終始懇切なるご指導いただきました松井正仁准教授、中村裕一准教授、尾崎仁志助教並びに工具の作製などについて多くの貴重なご指導をいただきました村井健一技術専門員に深く感謝いたします。

さらに、実験および考察に際して、惜しみないご協力をいただいたナノプロセッシング研究室武田直樹氏、松本浩和氏ならびにナノプロセッシング研究室諸氏に深く感謝いたします。