

平成 27 年度 修士論文

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

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

関 悠太郎

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
2.2 圧縮試験工具	4
2.2.1 圧縮試験工具の製作	4
2.2.2 カーボン蒸着	8
2.2.3 DLC コーティング	8
2.2.4 DLC コーティング及びカーボン蒸着による表面状態の影響	9
2.3 圧縮試験	11
2.3.1 圧縮試験装置	12
2.3.2 圧縮試験条件	13
2.4 触針式表面粗さ計(Surftest SJ-400)による評価方法	13
2.5 原子間力顕微鏡(AFM)による観察方法	14
2.6 工具表面のカーボン膜剥離面積率の測定	16
2.7 有限要素法(FEM)解析	16
2.7.1 解析モデルと条件	16
2.7.2 摩擦係数 μ の決定方法	17
2.7.3 相対すべり量 L_s と工具接触面圧 p の計算	18
第 3 章 圧縮加工による平滑化挙動	19
3.1 カーボン蒸着工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$),t-3(膜厚 $t=40\text{nm}$),A1050-H における実験結果	20
3.1.1 圧縮率と表面粗さの関係	20
3.1.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	22
3.1.3 有限要素法(FEM)解析結果	27
3.2 DLC 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	30
3.2.1 圧縮率と表面粗さの関係	30
3.2.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	32
3.2.3 有限要素法(FEM)解析結果	36
3.3 DLC コーティング工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), A1050-H における実験結果	38
3.3.1 圧縮率と表面粗さの関係	38
3.3.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	40
3.3.3 有限要素法(FEM)解析結果	45

3.4	DLC コーティング工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), A1050-O における実験結果	47
3.4.1	圧縮率と表面粗さの関係	47
3.4.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	49
3.4.3	有限要素法(FEM)解析結果	53
3.5	工具表面粗さの違いによる影響	55
3.5.1	圧縮率と表面粗さの関係	55
3.5.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	59
3.6	加工硬化による影響	63
3.6.1	圧縮率と表面粗さの関係	63
3.6.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	67
3.7	工具表面膜の違いによる影響	72
3.7.1	圧縮率と表面粗さの関係	72
3.7.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	74
3.8	各条件が平滑化に及ぼす影響	79
第 4 章	加工品表面のフラクタル解析	82
4.1	フラクタルの説明	82
4.2	フラクタル次元の決定法	84
4.2.1	零点集合次元	84
4.2.2	パワースペクトル次元	85
4.3	AFM システムにおけるフラクタル次元の測定法	88
4.3.1	零点集合次元 D_Z の測定法	88
4.3.2	パワースペクトル次元 D_{PS} の測定法	91
4.4	カーボン蒸着工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$),t-3(膜厚 $t=40\text{nm}$),A1050-H における解析結果	91
4.4.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	91
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	92
4.5	DLC 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	94
4.5.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	94
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	95
4.6	DLC コーティング工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), A1050-H における解析結果	97
4.6.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	97
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	98
4.7	DLC コーティング工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), A1050-O における解析結果	100
4.7.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	100
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	101
4.8	各条件における解析結果	103

4.8.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	103
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	107
第 5 章 結論		114
参考文献		116
謝辞		118

第 1 章 緒論

人工物、とくに機械システムの歴史の中で、人工物の代表寸法はここ 40 年ほどで飛躍的に微細化を遂げた⁽¹⁾。それに伴い様々な製品は小型、高精度などの要求に応えるため超精密加工が活用され、発展してきた⁽²⁾。そこで、一つの課題に挙げられるのが材料表面の形状である。小型化、高精度化において材料表面の凹凸が与える影響は大きく、より平滑な表面を得ることは今後のナノテクノロジーの発展に大きく関わることが予測される。

ナノメートルオーダーでの加工法は、レーザ加工、リソグラフィ、エッチングなど様々な方法があるが、塑性加工はそれらに比べ省資源、省エネルギーで短時間での加工が可能である。そこで、他の加工法に変わり塑性加工を用いてナノメートルオーダーの加工が可能になれば、生産性を大きく向上させることができると考えられる。これまで金属表面の平滑化に関する研究は、王ら⁽³⁾の金属表面の塑性変形による仕上げ加工を伴う押し出し形摩擦試験法を用いた潤滑被膜の特性評価に関する研究、池⁽⁴⁾らの塑性加工のトライボロジー現象と微細表面形状の加工との関連に関する研究、田中ら⁽⁵⁾のダイヤモンドチップ式バニシング工具を使用した際の、前加工である切削条件による表面性状に関する研究、高田ら⁽⁶⁾による高速回転するバニシング工具を用いて金属表面を擦過、攪拌し、用いる工具の先端形状が表面粗さに及ぼす影響を調べる研究、中野ら⁽⁷⁾の Ni めっき鋼線の引き抜き加工における表面光沢に及ぼす摩擦係数とダイス面圧の影響に関する研究、梶野ら⁽⁸⁾による微小段付きダイスを用いて棒材表面を平滑化する研究、安部ら⁽⁹⁾の超高張力鋼板に対して穴抜き加工された破断面に平滑加工を施すことによる穴広げ性の向上とその最適な加工条件に関する研究、H.J. Li ら⁽¹⁰⁾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る研究、H.B. Xie ら⁽¹¹⁾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、田中ら⁽¹²⁾の静油圧を用いた油圧バニシング工具の試作および連続面での押込量と送り速度の表面性状に与える影響に関する研究、Yang Bai ら⁽¹³⁾の金属の表面仕上げでの超音波振動の影響を調べる研究等がされている。

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。服部⁽¹⁴⁾は圧縮加工で用いられる工具表面の仕上げ法および評価法の確立を行った。大野⁽¹⁵⁾は工具の研磨方法を改善、アルミニウムおよび無酸素銅の圧縮加工における粗さの評価および表面の凹凸形状の評価に用いるナノメートルスケールで表面を再現できる 3 次元コンピュータシミュレーションの開発を行った。井川⁽¹⁶⁾は無酸素銅の圧縮加工における平滑化現象と相対変位量の関係についての検討を行った。また、フラクタル解析におけるプログラム処理の改良を行った。戸田⁽¹⁷⁾は試験片形状を帯板状から円板状に変更し、圧縮後の試験片表面の評価や相対すべり量と平滑化の関係を検討した。山口⁽¹⁸⁾は圧縮率を大きくした場合の試験片の平滑挙動について検討し、潤滑剤を変更した際の試験片表面への影響について解析した。小川⁽¹⁹⁾は従来の工具よりも表面粗さの大きい工具を用いて圧縮実験を行い、工具の表

面粗さが平滑化に及ぼす影響について検討した。赤塚⁽²⁰⁾は工具表面に蒸着するカーボン蒸着膜の膜厚の違いによる影響を調べるため、蒸着膜厚さ $t=10\text{nm}$ と 20nm についてアルミニウムの圧縮加工を行った。山本⁽²¹⁾は無潤滑の工具を用いて圧縮試験を行い、創成されたアルミニウム表面の平滑度について、蒸着膜の膜厚が平滑化に及ぼす影響を検討し、また、粗さの異なる二種類の工具を用いて実験を行い、工具表面が平滑化に及ぼす影響を検討した。脇⁽²²⁾はアルミニウム引抜き材 A1050-H について圧縮加工を行い、アルミニウム焼なまし材 A1050-O との比較を行い、加工硬化の違いによる影響を検討し、アルミニウム引抜き材 A1050-H について $R_a=10\text{nm}$ の工具表面に蒸着するカーボン蒸着膜の膜厚 $t=40\text{nm}$ として圧縮加工を行い、膜厚をさらに厚くした場合の影響を調べた。宮本⁽²³⁾はアルミニウム焼なまし材 A1050-O について $R_a=10\text{nm}$ の工具表面に潤滑剤として膜厚 $t=40\text{nm}$ のカーボン蒸着と膜厚 $t=100\text{nm}$ の DLC (Diamond Like Carbon) コーティングを施した工具を用いて圧縮加工を行い、工具表面膜の違いによる影響を調べた。

本研究では、アルミニウム引抜き材 A1050-H およびアルミニウム焼なまし材 A1050-O について $R_a=10\text{nm}$ または $R_a=5\text{nm}$ の工具表面に潤滑剤として膜厚 $t=100\text{nm}$ の DLC (Diamond Like Carbon) コーティングまたは膜厚 $t=40\text{nm}$ のカーボン蒸着を施した工具を用いて圧縮加工を行い、それぞれの実験結果との比較を行った。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 によって評価した。また、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い、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面圧を求め、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。また、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、アルミニウム焼なまし材とアルミニウム引抜き材の円板試験片を用いた圧縮試験を行い、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量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

本実験では供試材としてアルミニウム引抜き材 (A1050BD-H14) を用いた。Table 2.1 に化学成分を示す。

試験片は直径 15mm の棒材を直径 7mm、高さ 10mm の円柱状に旋削し、マイクロソー(笠井商工株式会社製, RCA-005)を用いて板厚が 1mm になるように切断し、#1500 のサンドペーパーと粒径 3 μ m のアルミナ(株式会社フジインコーポレーテッド製)を砥粒としたナイロンクロス(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 とした試験片とした。研磨方法については脇⁽²⁴⁾に基づき作成を行った。Fig. 2.1 に試験片の寸法, Fig. 2.2 に試験片初期表面の AFM 像の例を示す。

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

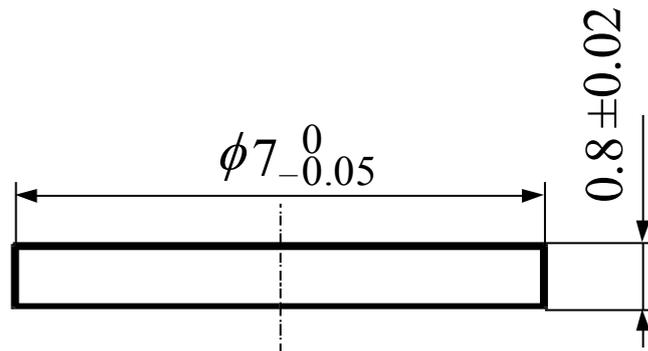
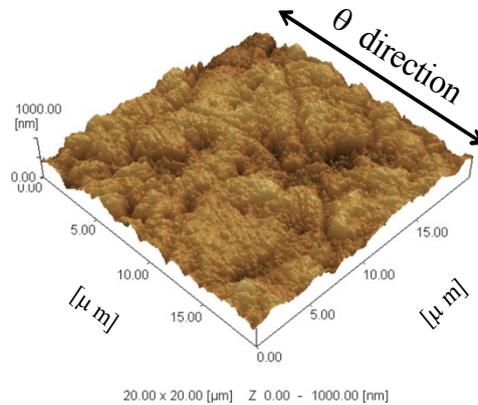
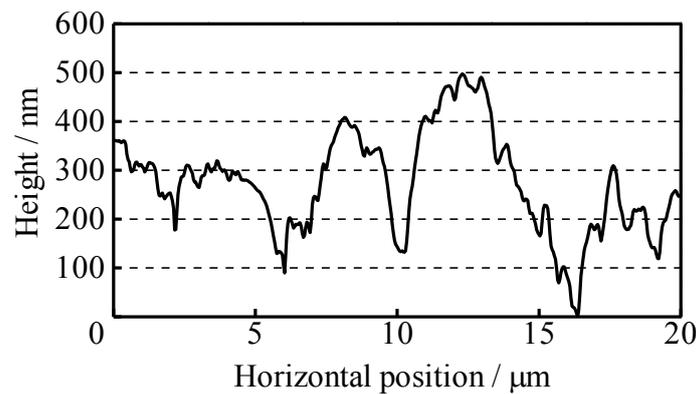


Fig.2.1 試験片の寸法



(a)3次元像



(b)断面曲線

Fig. 2.2 試験片初期表面の AFM 像の例($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)

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. 2.3 に圧縮試験に用いた 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. 2.4 に圧縮試験に用いた 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⁽²⁵⁾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. Fig. 2.5 に工具の寸法を示す. 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.

研磨後の工具 Tool-1 の外観を Fig.2.6 に, 工具表面の AFM 像を Fig.2.7 に, 工具表面の断

面曲線を Fig.2.8 に、Tool-2 の外観を Fig.2.9 に、工具表面の AFM 像を Fig.2.10 に、工具表面の断面曲線を Fig.2.11 に示す。

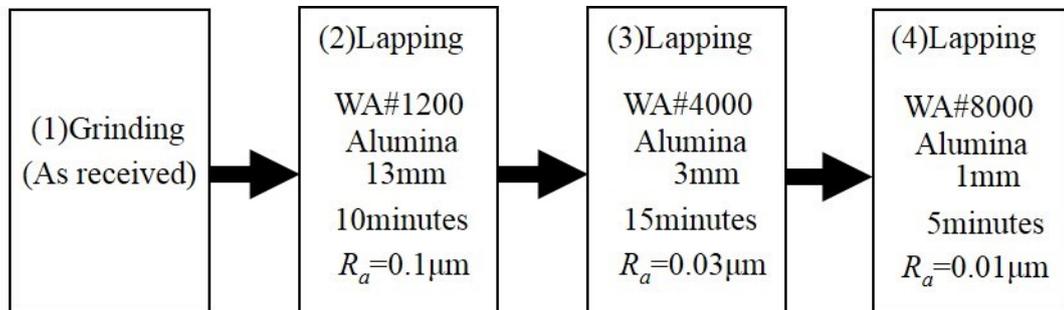


Fig. 2.3 工具の製作手順 (Tool-1)

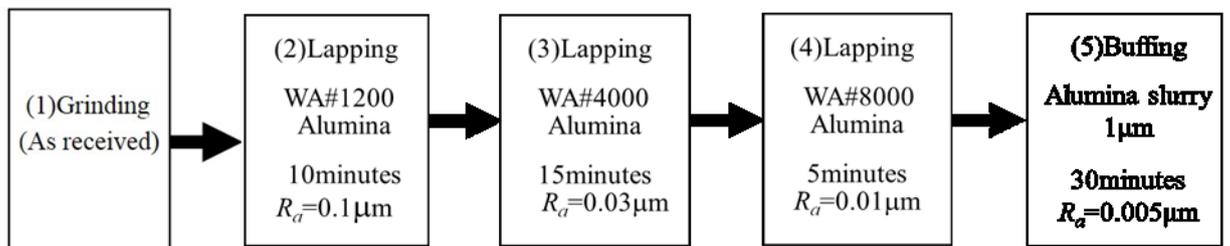
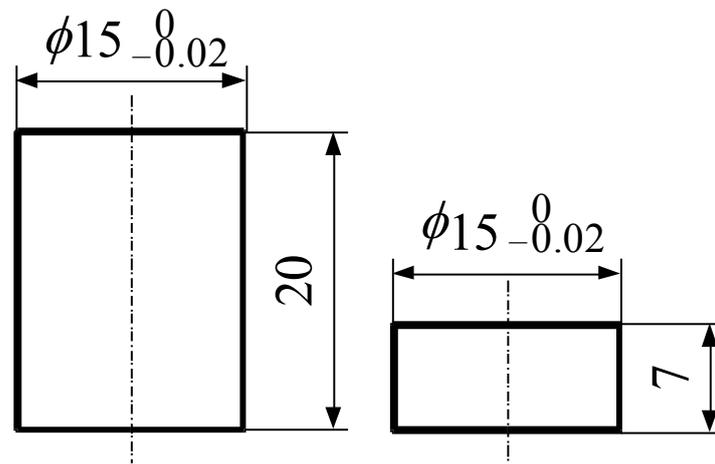


Fig. 2.4 工具の製作手順 (Tool-2)



(a)上工具

(b)下工具

Fig. 2.5 工具の寸法



Fig. 2.6 研磨後の工具表面(Tool-1)

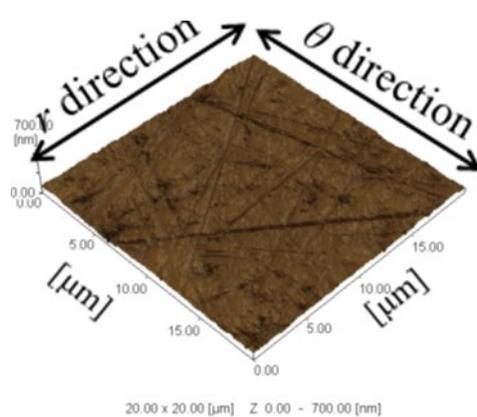


Fig. 2.7 工具表面の AFM 像(Tool-1)

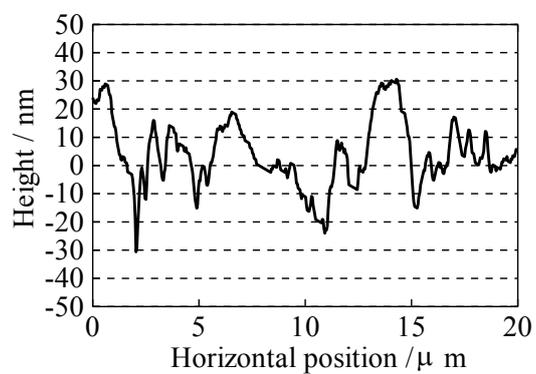


Fig. 2.8 工具表面の断面曲線(Tool-1)



Fig.2.9 研磨後の工具表面(Tool-2)

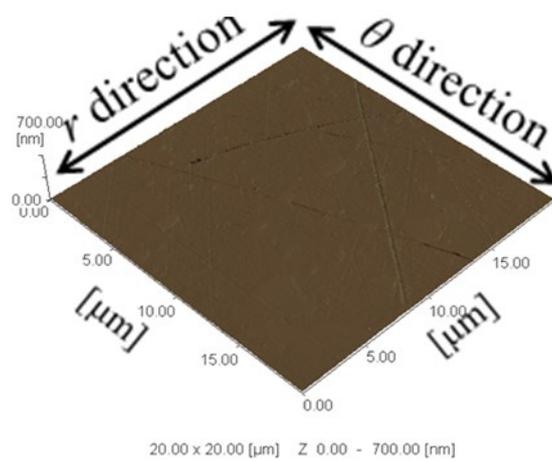


Fig. 2.10 工具表面の AFM 像(Tool-2)

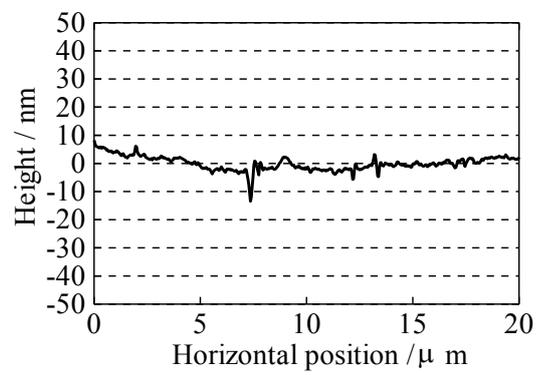


Fig. 2.11 工具表面の断面曲線(Tool-2)

2.2.2 カーボン蒸着

カーボン蒸着は真空蒸着用カーボン(日新EM株式会社 φ5×100mm)を真空蒸着装置(明石製作所製)を用いて真空蒸着した。真空蒸着装置の外観を Fig. 2.12 に示す。装置の使用手順については脇⁽²⁶⁾に基づきカーボン蒸着を行った。

2.2.3 DLC コーティング

工具への DLC (ダイヤモンドライクカーボン) コーティングは、日本アイ・ティ・エフ株式会社に依頼した。今回用いた同社のジニアスコート DLC シリーズ HA の仕様を Table 2.2 に示す。



Fig. 2.12 真空蒸着装置の外観

Table 2.2 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 Rz (μm)
ta-C	>3000	100	500℃	150~200℃	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

2.2.4 DLC コーティング及びカーボン蒸着による表面状態の影響

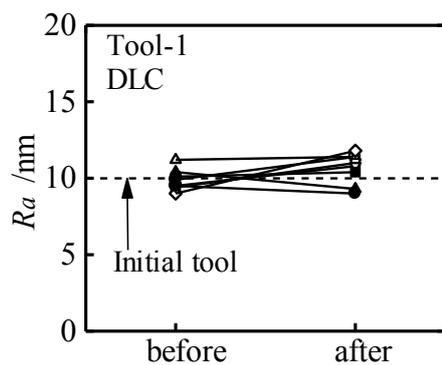
工具に DLC コーティング，カーボン蒸着を行った際のコーティングによる工具表面粗さの影響を調べるため，コーティング前後の各種データの比較を行った。

Fig.2.13 に DLC コーティング工具 Tool-1 のコーティング前後の算術平均粗さ R_a ，後述する算術平均面粗さ S_a (2.5 参照)，第 4 章で述べる零点集合次元 D_z およびパワースペクトル次元 D_{PS} を示す。コーティング前後で工具表面粗さ R_a には大きな違いは見られないが，算術平均面粗さ S_a ではコーティング後にわずかに粗くなっている様子が見られる。零点集合次元 D_z ，パワースペクトル次元 D_{PS} については大きな違いは見られなかった。

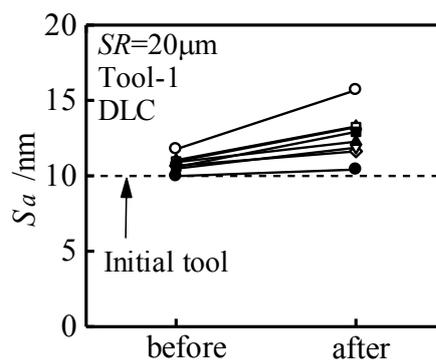
Fig.2.14 に DLC コーティング工具 Tool-2 のコーティング前後の算術平均粗さ R_a ，算術平均面粗さ S_a ，零点集合次元 D_z およびパワースペクトル次元 D_{PS} を示す。コーティング前後では工具表面粗さ R_a ，算術平均面粗さ S_a でコーティング後にわずかに粗くなっている様子が見られたが，工具表面粗さ R_a は算術平均面粗さ S_a ほど変化は見られなかった。また，零点集合次元 D_z には大きな違いは見られなかったが，パワースペクトル次元 D_{PS} はコーティング前と比べ，コーティング後は小さくなる傾向が見られた。

Fig.2.15 に カーボン蒸着膜の膜厚を $t=40\text{nm}$ ($t-3$) としたカーボン蒸着工具 Tool-2 の蒸着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。蒸着前後で工具表面粗さ R_a ，算術平均面粗さ S_a に大きな違いは見られない。また，零点集合次元 D_z には大きな違いは見られなかったが，パワースペクトル次元 D_{PS} は蒸着前に比べ，蒸着後は小さくなる傾向が見られた。

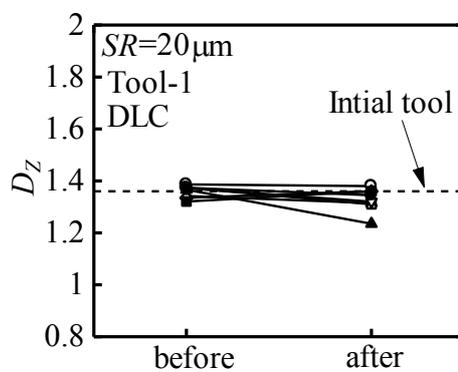
算術平均粗さ R_a は 3 種類の工具共に前後で大きな違いは見られなかった。しかし算術平均面粗さ S_a は，DLC コーティング工具の Tool-1, Tool-2 ではコーティング後に大きくなる傾向が見られた。また，零点集合次元 D_z は 3 種類の工具共に前後で大きな違いは見られなかった。パワースペクトル次元 D_{PS} は DLC コーティング工具，カーボン蒸着工具の Tool-2 でコーティング後に小さくなる傾向が見られた。このことから，DLC をコーティングした際に算術平均面粗さ S_a はわずかに大きくなると考えられる。さらにパワースペクトル次元 D_{PS} の観点から見ると，表面粗さの小さい Tool-2 で小さくなる傾向が見られることから，DLC コーティングやカーボン蒸着を行うことによって表面形状が僅かにではあるが変化することがわかる。



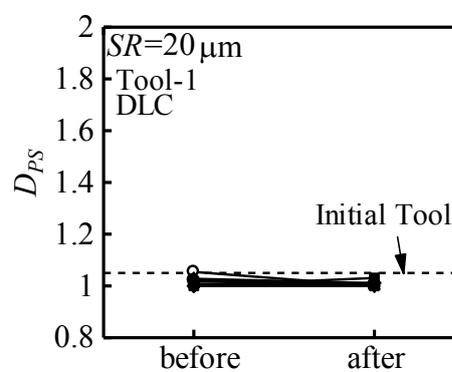
(a) DLC コーティング前後の
算術平均粗さ R_a



(b) DLC コーティング前後の
算術平均面粗さ S_a

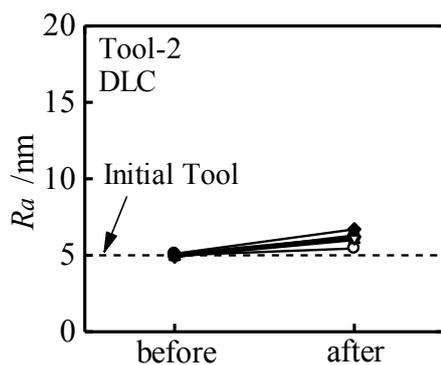


(c) DLC コーティング前後の
零点集合次元 D_z

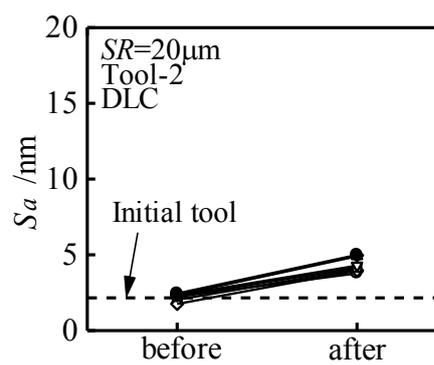


(d) DLC コーティング前後の
パワースペクトル次元 D_{PS}

Fig.2.13 DLC コーティング工具 (Tool-1)



(a) DLC コーティング前後の
算術平均粗さ R_a



(b) DLC コーティング前後の
算術平均面粗さ S_a

Fig.2.14 DLC コーティング工具 (Tool-2)

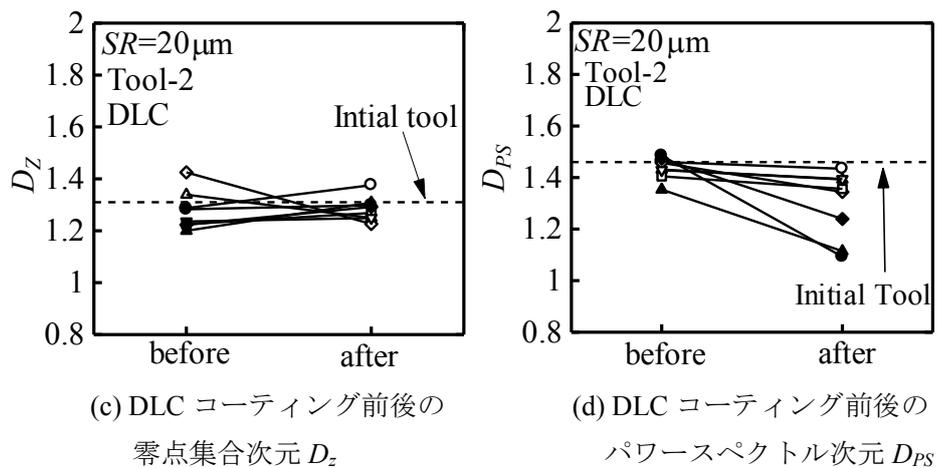


Fig.2.14 DLC コーティング工具 (Tool-2)

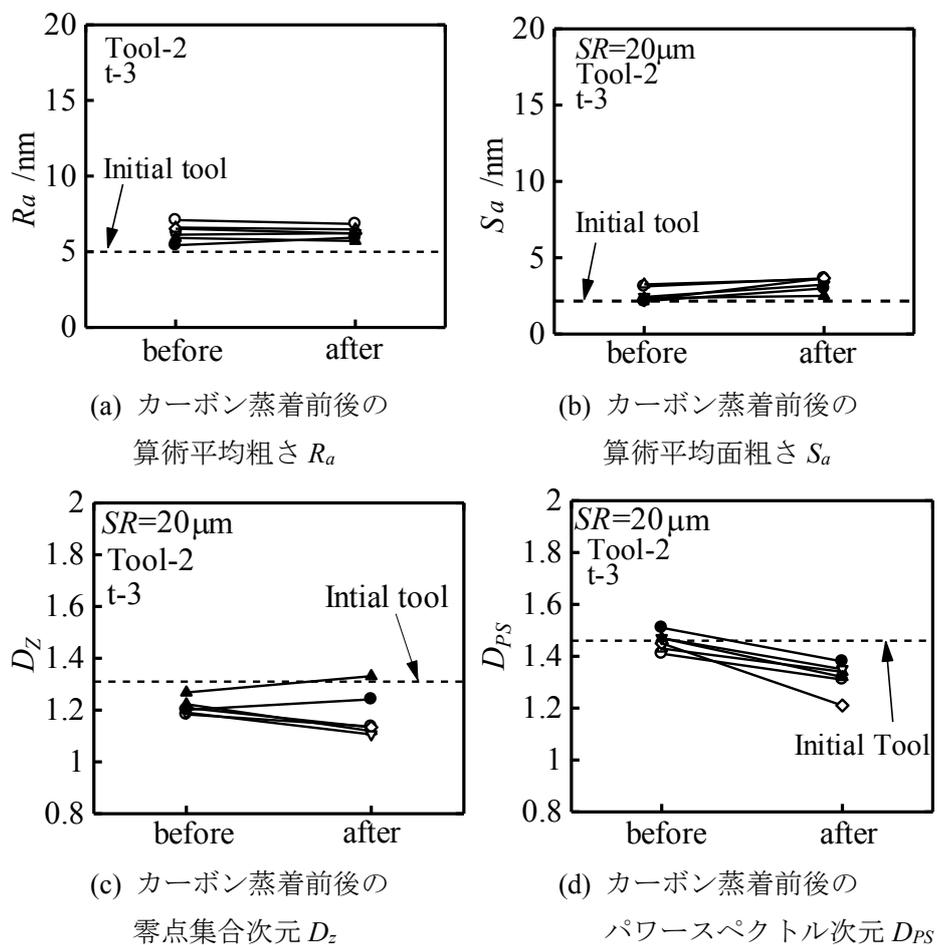


Fig.2.15 カーボン蒸着工具 (Tool-2, t-3)

2.3 圧縮試験

圧縮試験では、工具表面にカーボン蒸着、または DLC コーティング膜を施した実験を行

った。圧縮試験の実験手順については脇⁽²⁷⁾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)

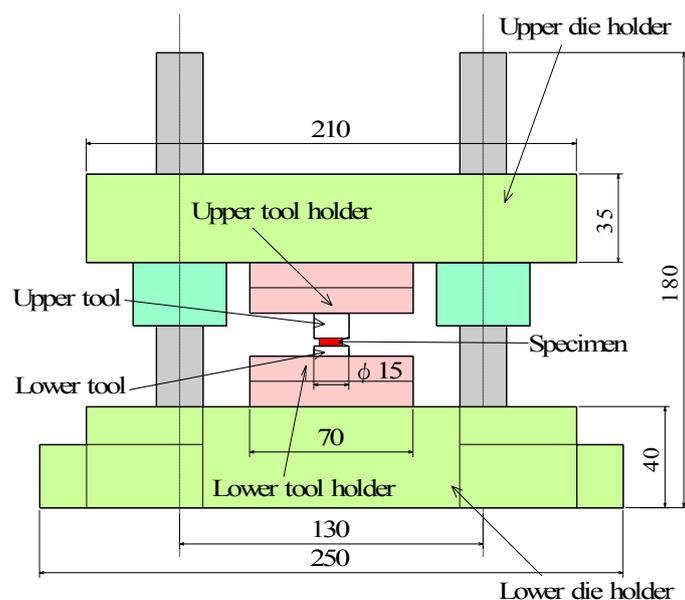


Fig. 2.17 圧縮工具とダイセットの概略図

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-112)に接続したデジタルゲージ(ONO SOKKI 製 DIGITAL-ANALOG OUT GAUGE DG-450)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。そして、出力された電圧と荷重、電圧と変位量の校正を行った。

その結果、荷重については

98[kN]レンジの場合：荷重値[N]=1006.64×出力電圧[mV]

49[kN]レンジの場合：荷重値[N]=499.24×出力電圧[mV]

24.5[kN]レンジの場合：荷重値[N]=249.318×出力電圧[mV]

の関係が得られ、変位については「変位値[mm]=0.0982×出力電圧[V]」の関係が得られた。

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. 2.18 に示す。触針式表面粗さ計は Fig. 2.19 に示すように先端半径 2~10 μ m 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 μ m、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⁽²⁸⁾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. 2.18 触針式表面粗さ計(Surftest SJ-400)の外観

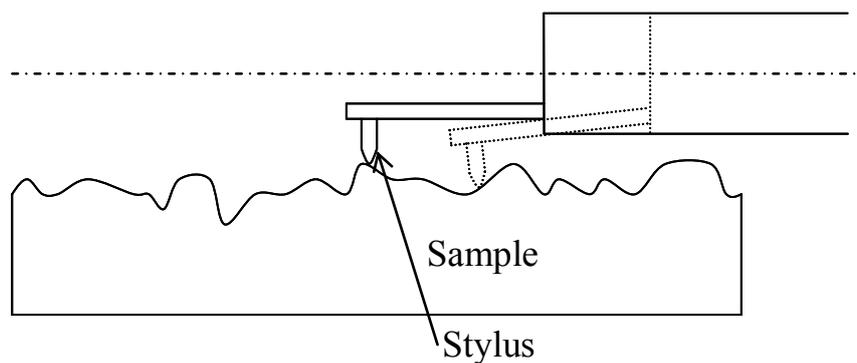


Fig. 2.19 触針式表面粗さ計の原理図

2.5 原子間力顕微鏡(AFM)による観察方法⁽²⁹⁾

SPM(Scanning Probe Microscope)装置とその周辺システムの外観写真を Fig. 2.20 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⁽³⁰⁾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. 2.21 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. 2.21 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。

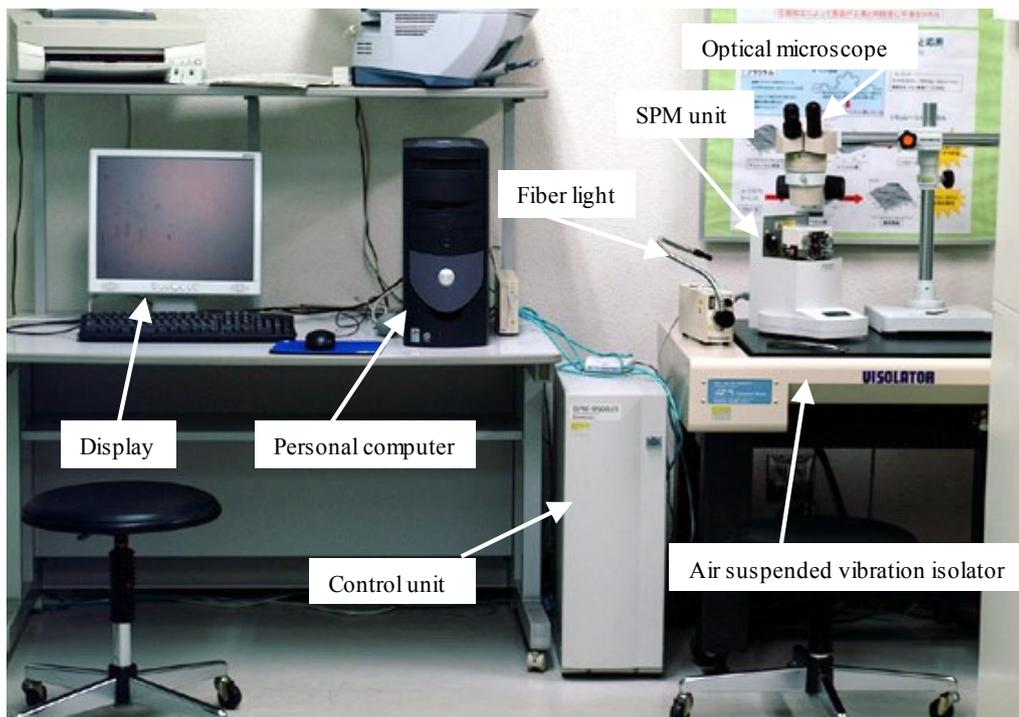


Fig. 2.20 SPM 装置および周辺装置の外観

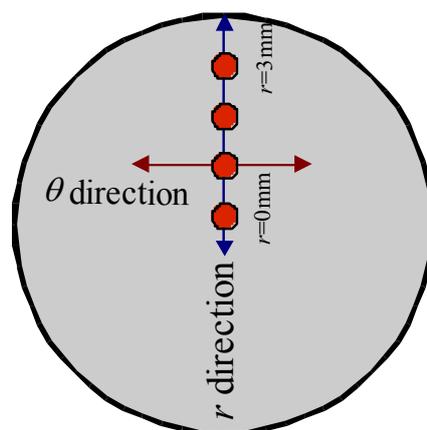


Fig. 2.21 圧縮後試験片の AFM 観察を行う場所

2.6 工具表面のカーボン膜剥離面積率の測定

カーボンを蒸着させた工具を用いて圧縮試験を行う場合、工具表面のカーボン膜の剥離が起きることがある。そして、これによって工具と試験片が金属接触して試験片表面が粗くなるというように、カーボン膜の剥離は平滑化に大きく影響を及ぼすものと考えられる。そこで本研究では、工具表面のカーボン膜の剥離が平滑化に及ぼす影響を調べるために剥離面積率 γ を定義した。剥離した面積、見かけ上の接触面積の測定方法については脇⁽³¹⁾に基づき行った。剥離面積率 γ は以下の式より算出される。

$$\gamma = \frac{A_P}{A_A} \times 100 \quad (2.2)$$

(A_P : 剥離した面積, A_A : 見かけ上の接触面積)

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. 2.22 に FEM 解析モデルと境界条件, Table 2.3 に FEM 解析条件を示す。

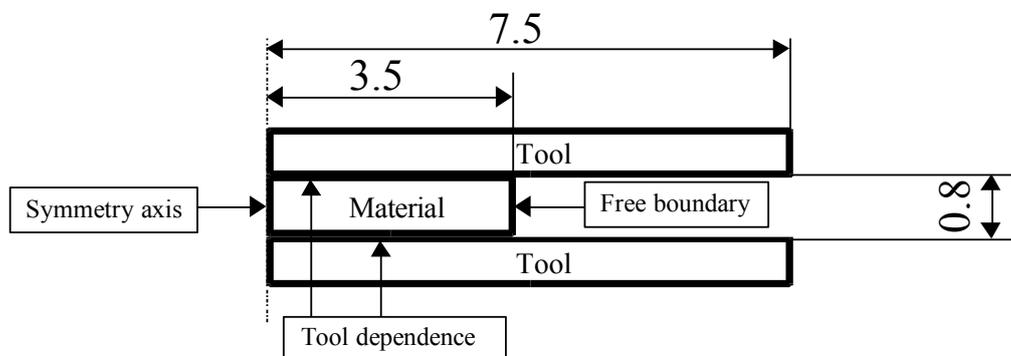


Fig. 2.22 FEM 解析モデルと境界条件

Table 2.3 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. 2.23 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. 2.24 に、本研究で使用したアルミニウム試験片の変形抵抗曲線を示す。

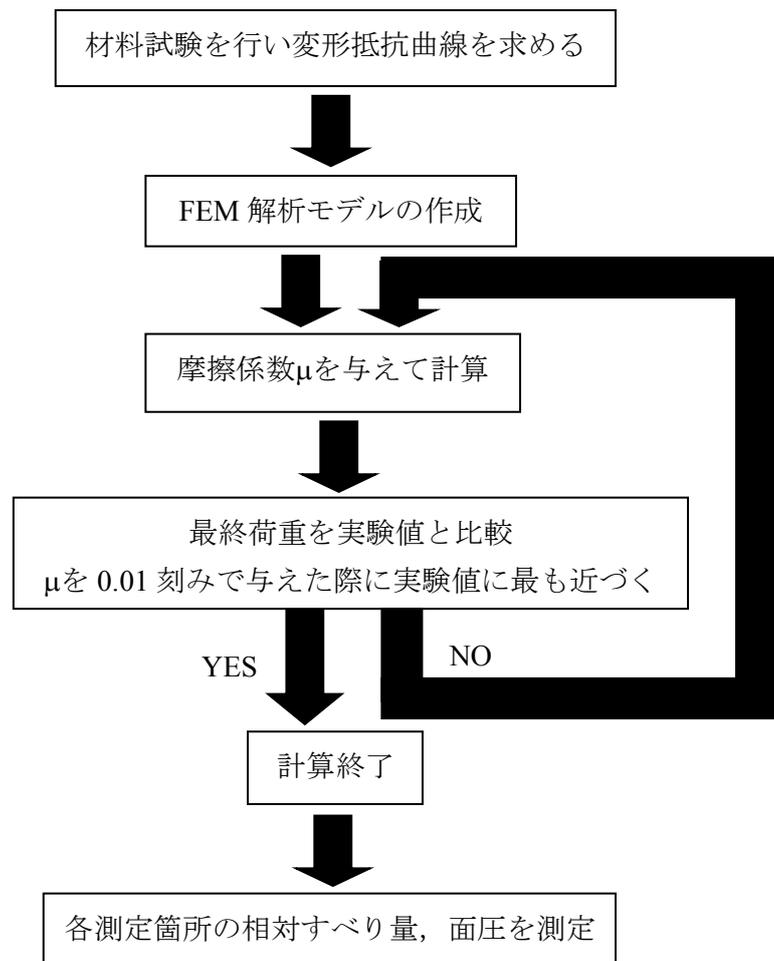


Fig. 2.23 摩擦係数 μ の決定方法

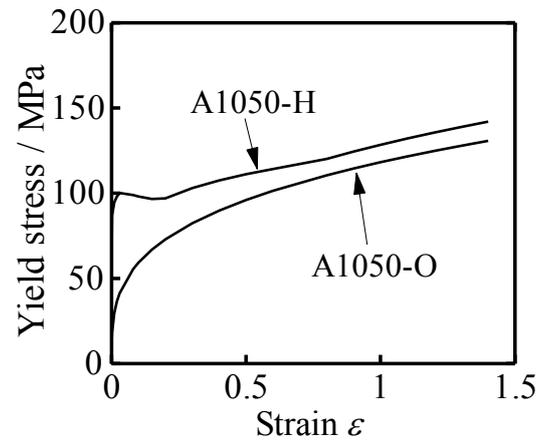


Fig. 2.24 アルミニウム試験片の変形抵抗曲線

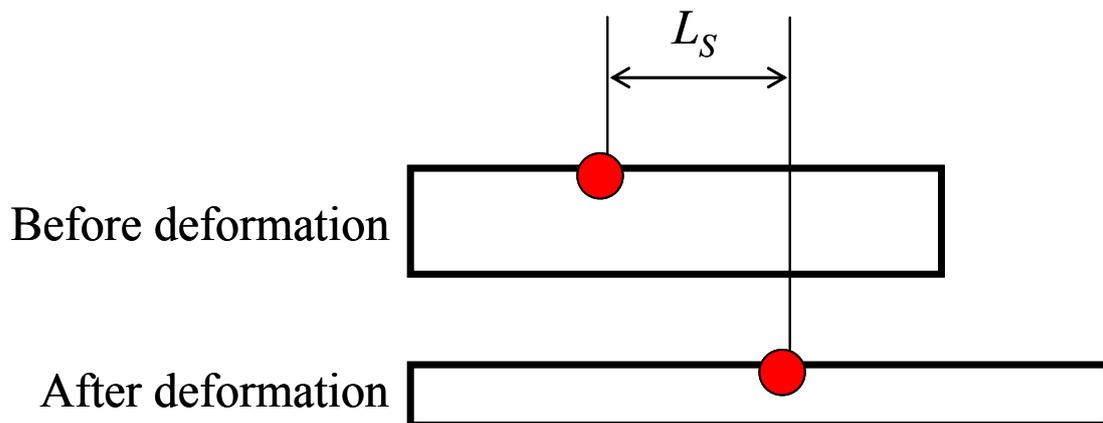


Fig. 2.25 相対すべり量 L_S の定義

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. 2.25 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。

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、膜厚について研究を行ってきた。

本研究では、工具表面粗さ、加工硬化、工具表面膜の違いによる影響を調べるため、Table 3.2 に示す圧縮試験条件で実験を行った。さらに表面粗さ計・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、工具表面粗さの影響、加工硬化の影響、膜種の影響について検討した。また、これまでにカーボン蒸着膜を $t=0,10,20,40\text{nm}$ （それぞれ $t-0,t-1,t-2,t-3$ ）とし研究を行ってきたが、本研究ではそれらの中で最も優れていた条件である $t=40\text{nm}$ ($t-3$) を用い、比較、検討を行った。

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 (t-2)
			40 (t-3)
		5 (Tool-2)	0 (t-0)
			10 (t-1)
			20 (t-2)
			40 (t-3)
	DLC	10 (Tool-1)	100
A1050-H	Carbon	10 (Tool-1)	20 (t-2)
			40 (t-3)
	5 (Tool-2)	20 (t-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-O	DLC	5 (Tool-2)	100
A1050-H	Carbon	5 (Tool-2)	40 (t-3)
	DLC	10 (Tool-1)	100
		5 (Tool-2)	100

3.1 カーボン蒸着工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$), t-3 (膜厚 $t=40\text{nm}$), 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 $e_c=40\%$ 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。高圧縮率で写真のような剥離した様子が観察された。

Fig.3.3 に剥離面積率 γ 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剥離面積率も大きくなる。

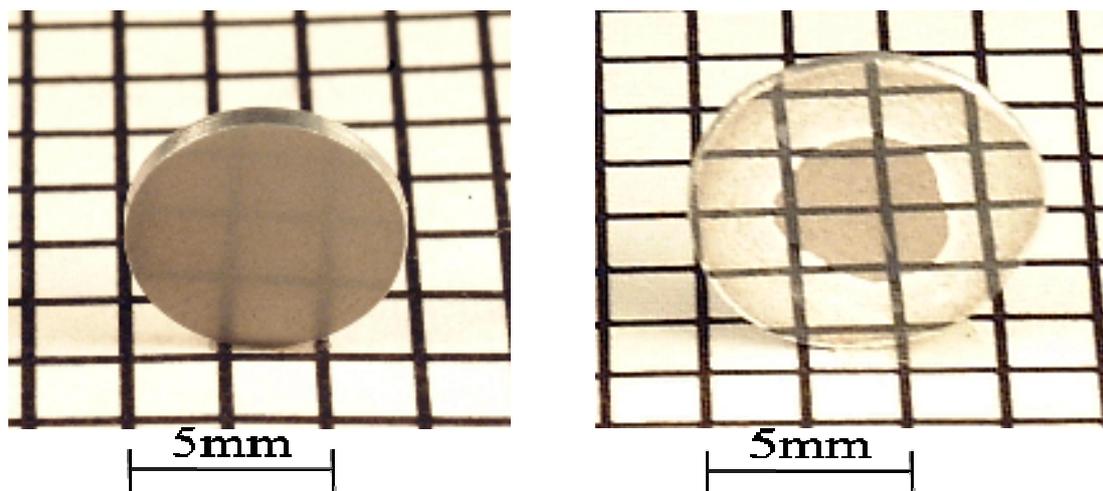
Fig.3.4 に触針式表面粗さ計より得られた算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。低圧縮率であっても平滑化が進んでいることがわかる。これは、H 材は加工硬化により初期の変形抵抗が大きく、転写効果が大きいためと考えられる。圧縮率が大きくなっても R_a の違いはあまり見られない。

各実験において測定された最終荷重 P_{MAX} と圧縮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.3.5 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率が高くなるほど平均面圧が大きくなることがわかる。また、加工硬化により初期の変形抵抗の大きい H 材を用いているため、加工初期の段階でも平均面圧が大きくなっている。

Fig.3.6 に荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係を示す。圧縮率による曲線の違いは見られず、ほぼ同じ荷重、変位で圧縮されていることがわかる。



(a) 圧縮前試験片

(b) 圧縮後試験片($e_c=40\%$)

Fig.3.1 圧縮前後の試験片の外観 (t-3, Tool-2, A1050-H)

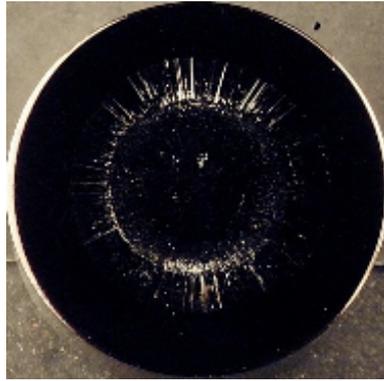


Fig.3.2 圧縮後工具表面 (t-3, Tool-2, A1050-H, $e_c=51\%$, $\gamma=13\%$)

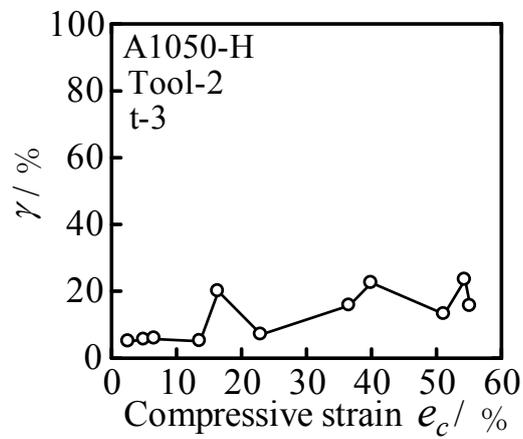


Fig.3.3 剥離面積率 γ と圧縮率 e_c の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)

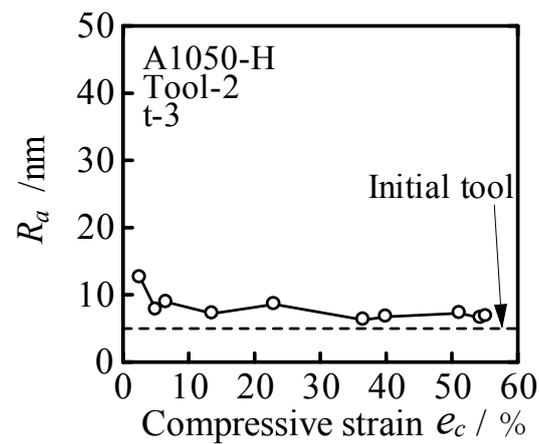


Fig.3.4 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)

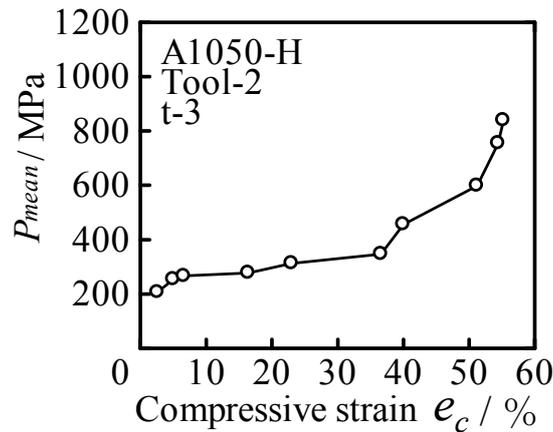


Fig.3.5 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)

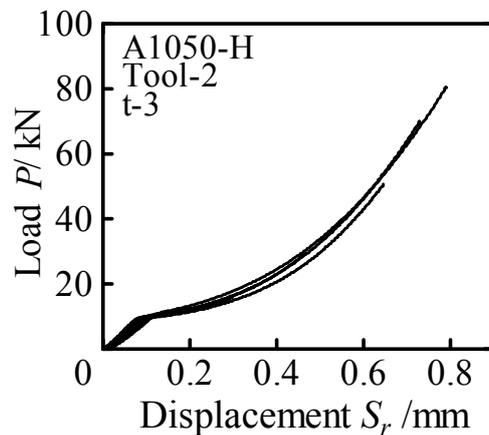


Fig.3.6 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)

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.3.7 に試験片初期表面の AFM 像を、Fig.3.8 に $e_c=40\%$ に圧縮した試験片の AFM 像を示す。画像より、外周部で平滑化が進んでいる様子がわかる。また、外周部では材料流動した様子も見られる。

Fig.3.9 に算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率が高くなるほど S_a は小さくなり、平滑化が進んでいる。また、 $e_c=40\%$ 付近までは中心部より外周部の S_a の方が小さく、 $e_c=40\%$ 付近ではほとんど差がなくなり、 $e_c=50\%$ を超えるとばらつきが出るのがわかる。これは高圧縮率の外周部でカーボン蒸着膜が剥離し、その影響により S_a が大きくなる場合があるためと考えられる。

Fig.3.10 に算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。低圧縮率において、外周部よりも中心部の方が平滑化が進む傾向がある。これは、低圧縮率では中心部の高面圧による転写効果が外周部の材料流動によるしごき効果よりも大きいためだと考えられる。また、圧

縮率が 20%を超えると中心部よりも外周部の方が平滑化が進み、さらに圧縮率が高くなると外周部が粗くなる場合もある。

Fig.3.11 に t-3 の測定箇所 $r=1\text{mm}$, Fig.3.12 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 θ 方向よりも r 方向の方が R_{ae} が小さくなる場合がある。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。

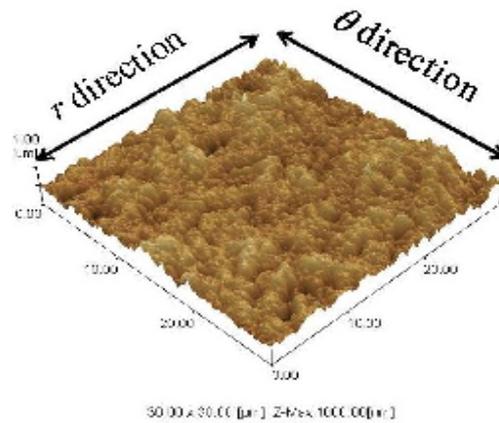
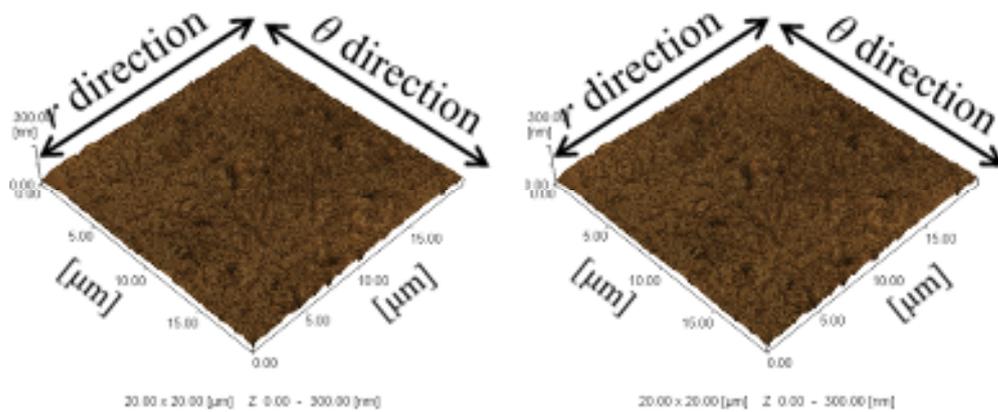


Fig.3.7 試験片初期工具の AFM 像の例
($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)



(a) 測定箇所 $r=0\text{mm}$

(b) 測定箇所 $r=1\text{mm}$

Fig.3.8 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像の例

($e_c=40\%$, $SR=20\mu\text{m}$, t-3, Tool-2, A1050-H)

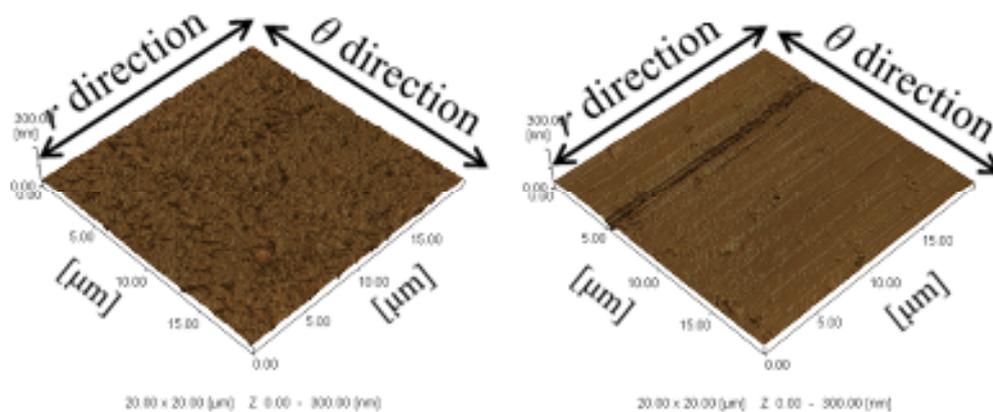
(c) 測定箇所 $r=2\text{mm}$ (d) 測定箇所 $r=3\text{mm}$

Fig.3.8 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像の例
 $(e_c=40\%, SR=20\mu\text{m}, t-3, \text{Tool-2}, \text{A1050-H})$

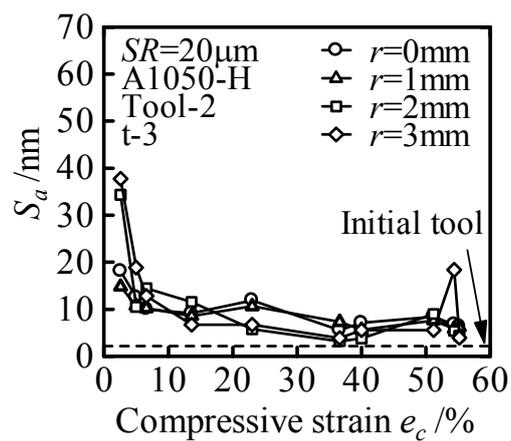


Fig.3.9 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 ($t-3, \text{Tool-2}, \text{A1050-H}$)

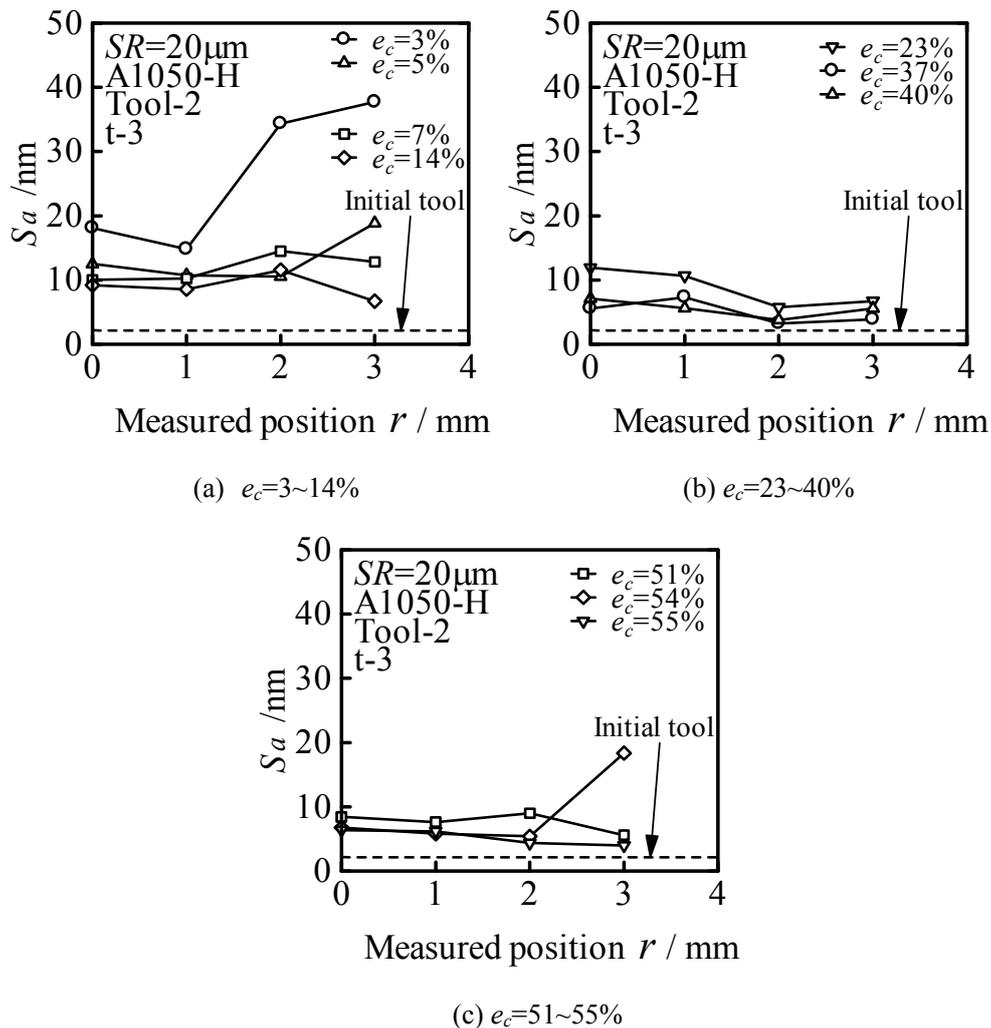


Fig.3.10 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)

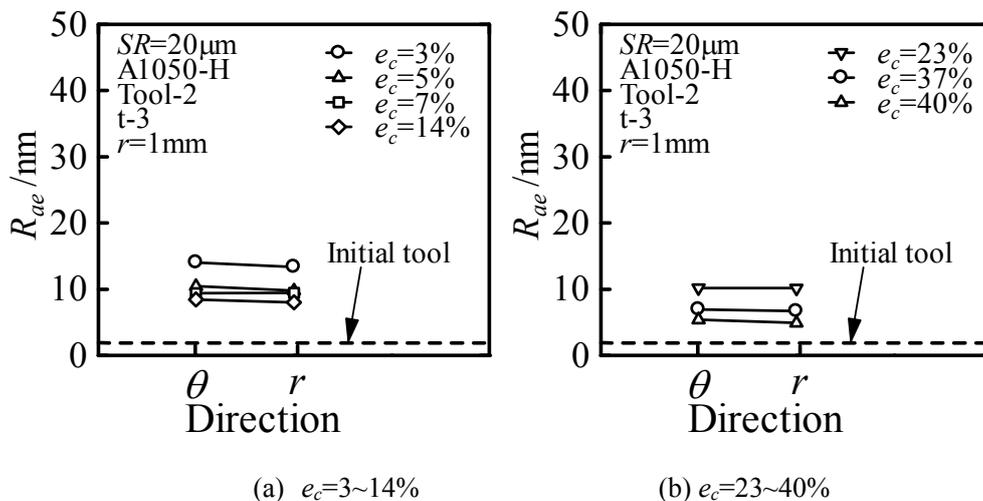
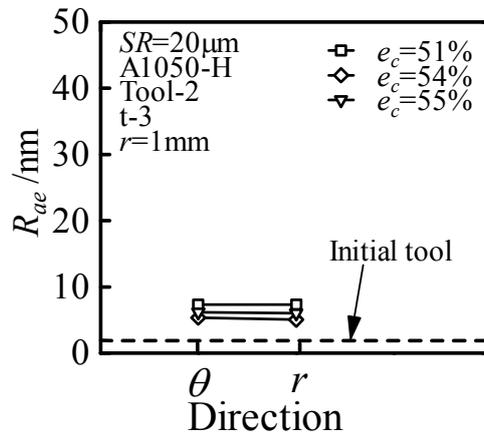
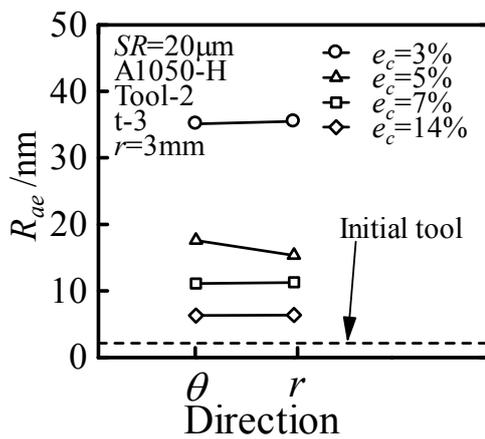


Fig.3.11 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=1\text{mm}$, t-3, Tool-2, A1050-H)

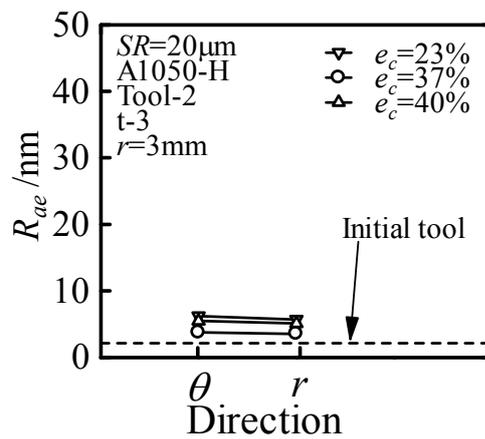


(c) $e_c=51\sim55\%$

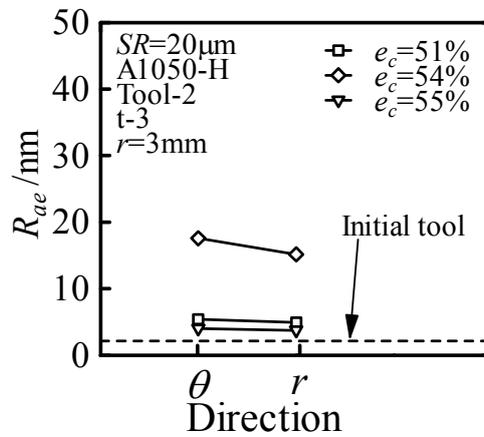
Fig.3.11 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=1\text{mm}$, t-3, Tool-2, A1050-H)



(a) $e_c=3\sim14\%$



(b) $e_c=23\sim40\%$



(c) $e_c=51\sim55\%$

Fig.3.12 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=3\text{mm}$, t-3, Tool-2, A1050-H)

3.1.3 有限要素法(FEM)解析結果

Fig.3.13 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、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次の式より求めた。

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

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。実験と FEM はおおむね一致していることがわかる。

Fig.3.14 に FEM 解析による変形の様子を示す。中心部の相対すべり量は小さく、外周部ほど相対すべり量が大きくなる傾向がある。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 0.17~0.50 となっている。各実験での潤滑状態は違いがあると考えられる。

Fig.3.15 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。どの圧縮率でも中心部は面圧が大きく、 L_S が大きくなるほど面圧が小さくなることがわかる。また、圧縮率が大きくなると面圧も大きくなることもわかる。

Fig.3.16 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。低圧縮率では相対すべり量が大きいほど S_a が小さくなる傾向が見られるが、圧縮率 $e_c=30\%$ を超えると相対すべり量による S_a の大きな違いは見られなくなる。これは初期の圧縮段階では材料流動によるしごき効果で平滑化が進み、その後面圧による転写効果で中心部が平滑化されるためと考えられる。また、高圧縮率では外周部でばらつきが出てくることがわかる。これはカーボン蒸着膜の剥離によるものと考えられる。

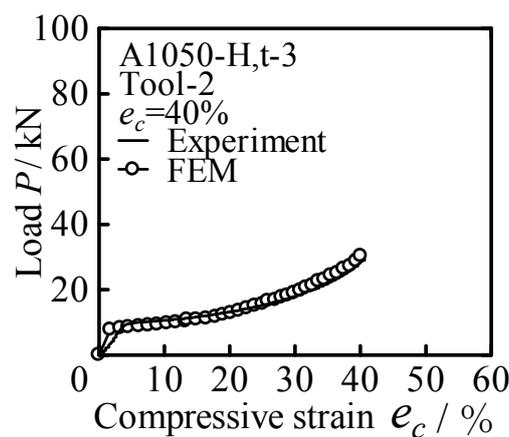


Fig.3.13 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)

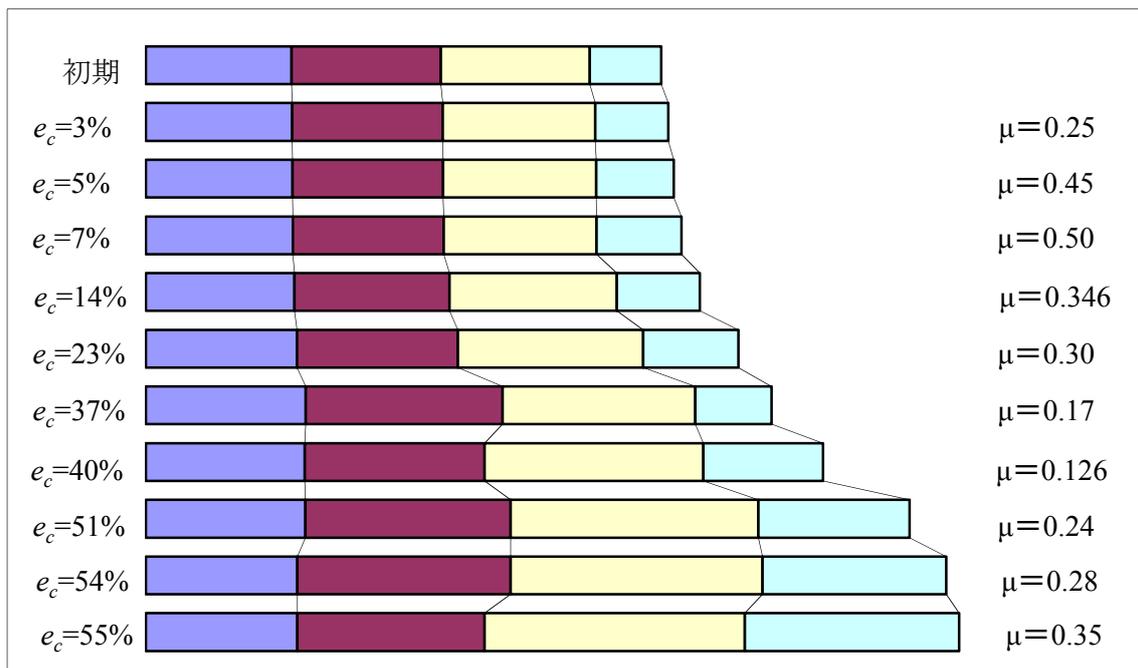
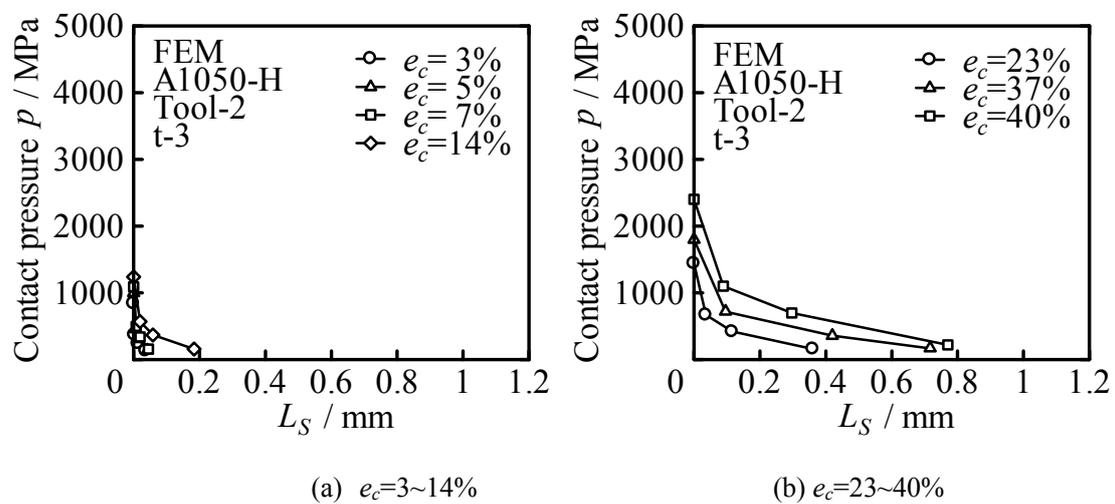
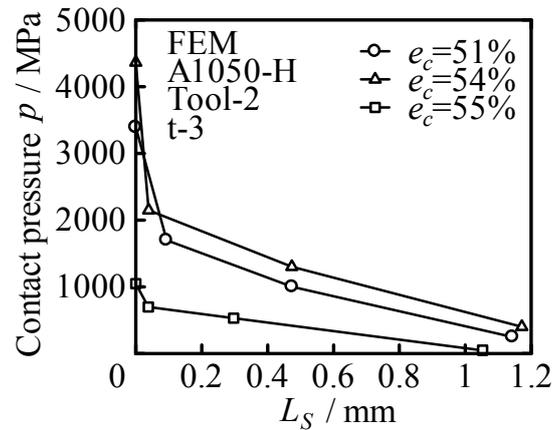
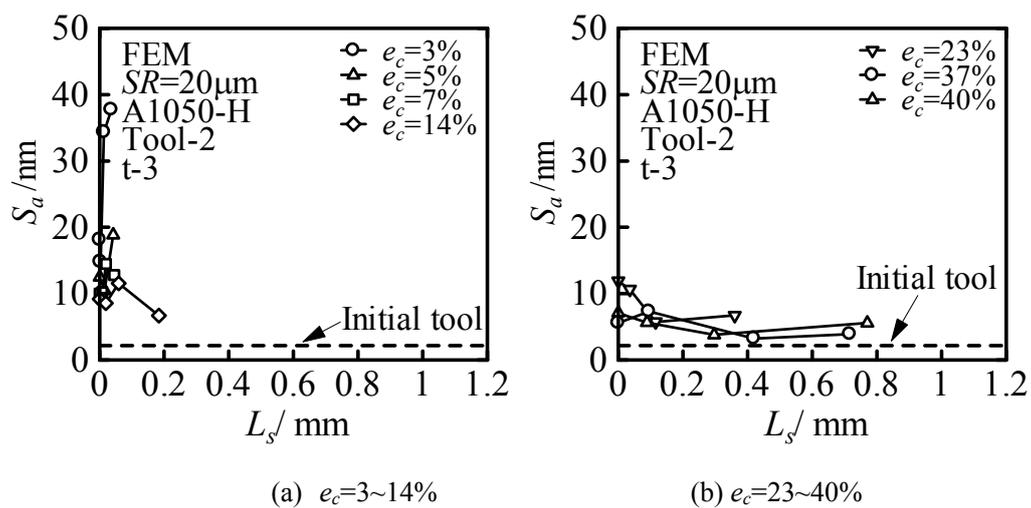
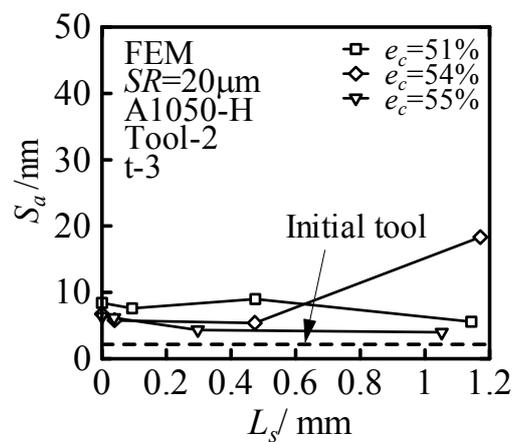


Fig.3.14 FEM 解析による変形の様子

($e_c=3\%:\mu=0.25$, $e_c=5\%:\mu=0.45$, $e_c=7\%:\mu=0.50$, $e_c=14\%:\mu=0.346$, $e_c=23\%:\mu=0.30$, $e_c=37\%:\mu=0.17$,
 $e_c=40\%:\mu=0.126$, $e_c=51\%:\mu=0.24$, $e_c=54\%:\mu=0.28$, $e_c=55\%:\mu=0.35$)

Fig.3.15 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)

(c) $e_c=51\sim55\%$ Fig.3.15 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)(a) $e_c=3\sim14\%$ (b) $e_c=23\sim40\%$ (c) $e_c=51\sim55\%$ Fig.3.16 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)

3.2 DLC 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

3.2.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.17 に圧縮前と平滑化が進んでいる圧縮率 $e_c=51\%$ 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.3.18 に圧縮後工具表面写真の例を示す。高圧縮率の外周部で写真のように僅かに工具表面状態が悪化した様子が観察された。

Fig.3.19 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。H 材を用いているため、低圧縮率でも初期試験片の R_a に比べ大きく平滑化され、初期工具に近い平滑度が得られていることがわかる。また圧縮率が 30%付近で最も平滑化され、初期工具と同等の平滑度が得られている。

Fig.3.20 に t-3 の平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率が高くなるほど平均面圧が大きくなることがわかる。また、加工硬化により初期の変形抵抗の大きい H 材を用いているため、加工初期の段階でも平均面圧が大きくなっている。

Fig.3.21 に t-3 の荷重 P とレコーダー出力変位 S_r の関係を示す。圧縮率による曲線の違いは見られず、ほぼ同じ荷重、変位で圧縮されていることがわかる。

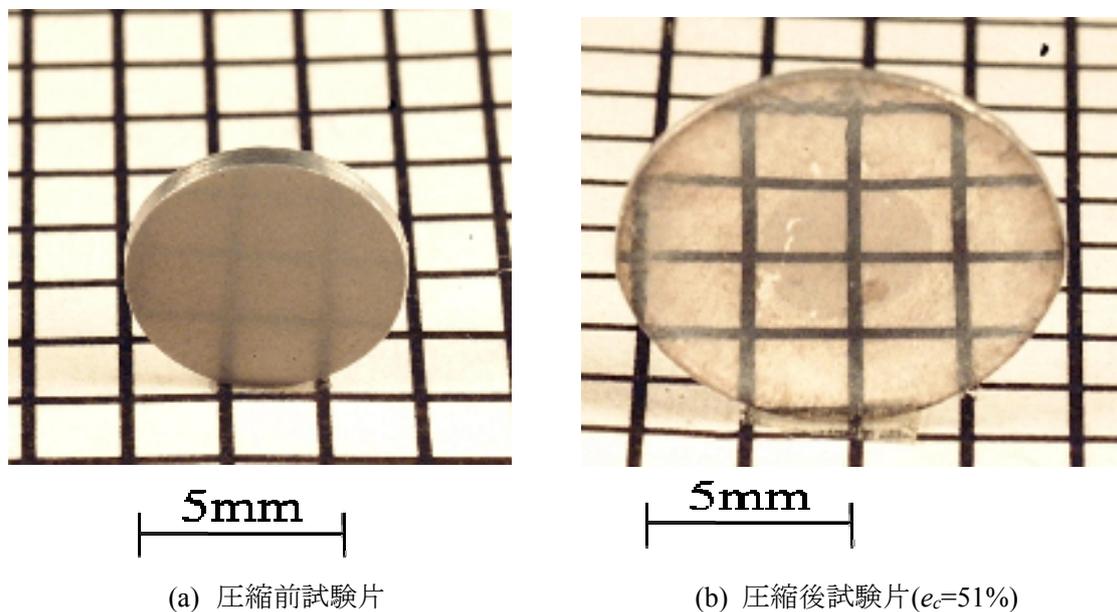


Fig.3.17 圧縮前後の試験片の外観 (DLC, Tool-1, A1050-H)

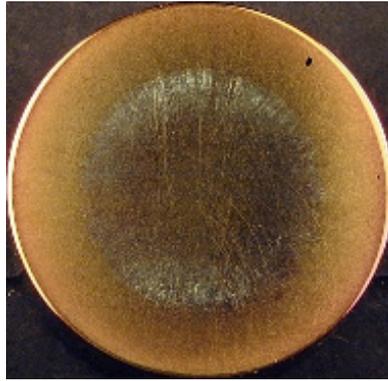


Fig.3.18 圧縮後工具表面 (DLC, Tool-1, A1050-H, $e_c=51\%$)

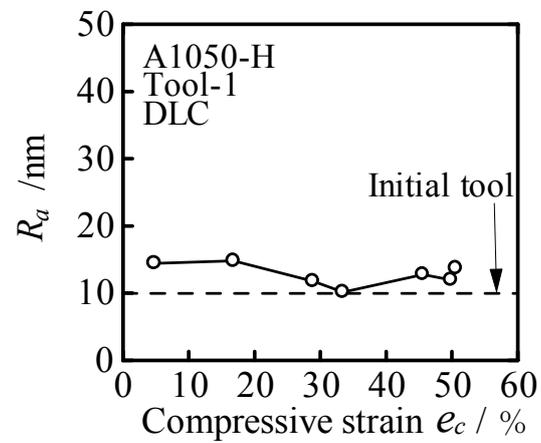


Fig.3.19 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)

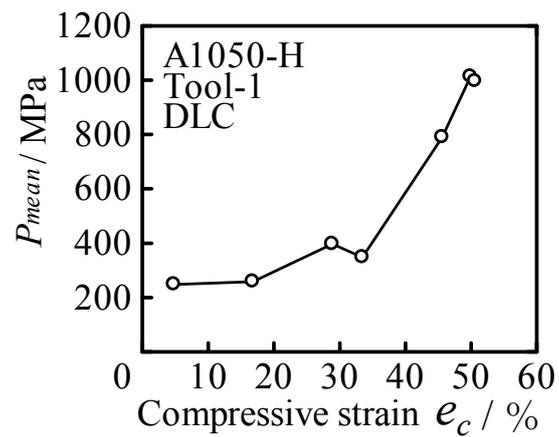


Fig.3.20 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)

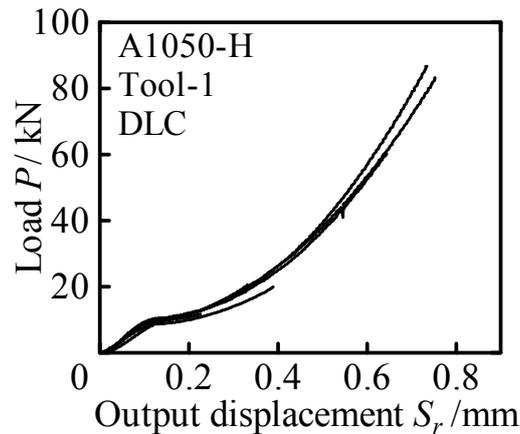


Fig.3.21 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)

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.3.22 に試験片初期表面の AFM 像を、Fig.3.23 に $e_c=40\%$ に圧縮した試験片の AFM 像を示す。画像より、外周部で平滑化が進んでいる様子がわかる。また、外周部では材料流動した様子も見られる。

Fig.3.24 に算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの測定箇所でも圧縮率が大きいほど平滑化が進み、30%を超えると初期工具と同等の平滑度が得られる場合もあるが、50%付近では僅かに S_a が大きくなる様子も見られる。これは H 材を用いたため高压縮率では工具表面状態が悪化したためと考えられる。

Fig.3.25 に算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。いずれの圧縮率でも中心部より外周部で平滑化される傾向が見られる。また、圧縮率が 30%を超えると測定箇所によっては初期工具と同等の平滑度が得られていることがわかる。

Fig.3.26 に測定箇所 $r=1\text{mm}$ 、Fig.3.27 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。 $r=1\text{mm}$ では僅かに θ 方向よりも r 方向の方が R_{ae} が小さくなる場合があるが、 $r=3\text{mm}$ に比べ、大きな違いは見られない。対して $r=3\text{mm}$ ではいずれの場合も θ 方向よりも r 方向の方が R_{ae} が小さくなる様子が見られる。これは、 r 方向では材料流動により 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。

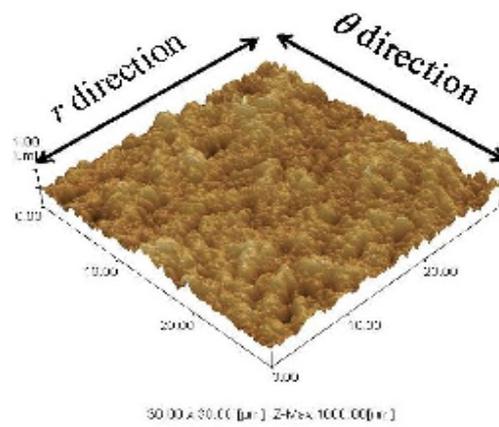


Fig.3.22 試験片初期工具の AFM 像の例
($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)

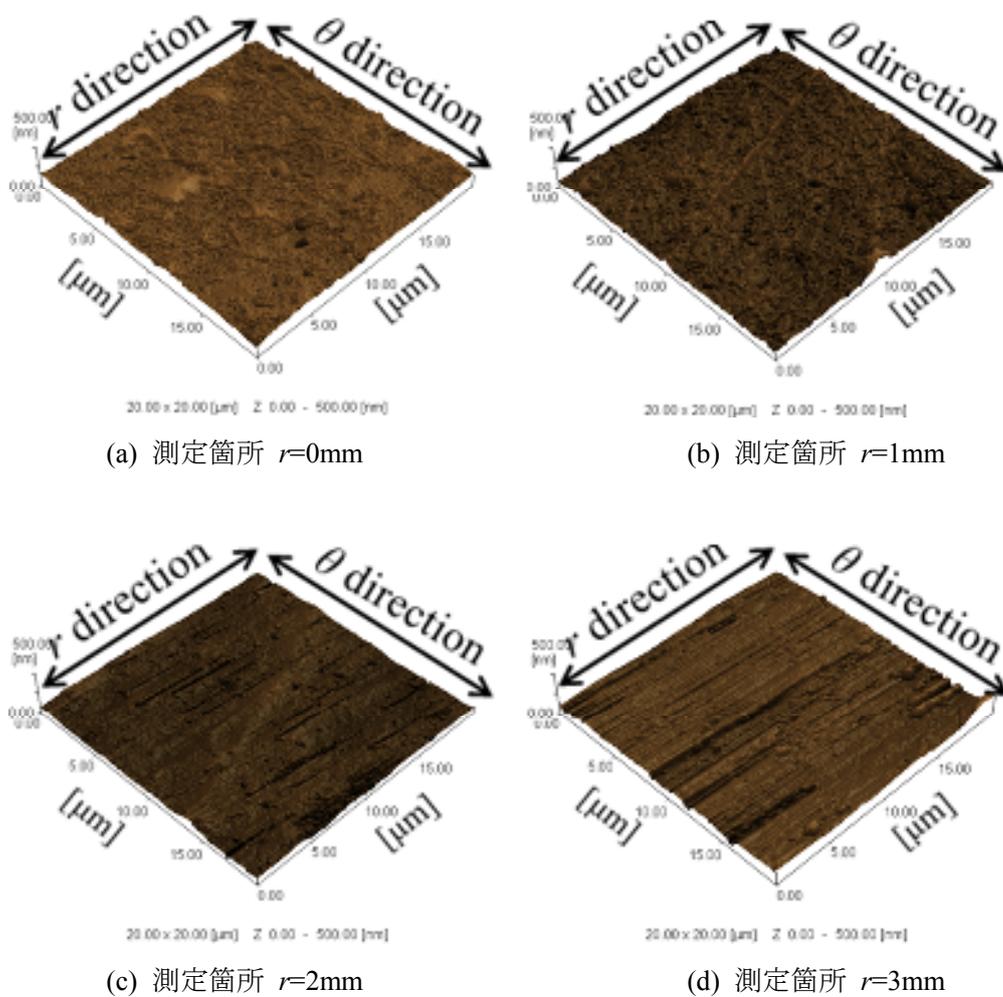


Fig.3.23 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像の例
($e_c=51\%$, $SR=20\mu\text{m}$, DLC, Tool-1, A1050-H)

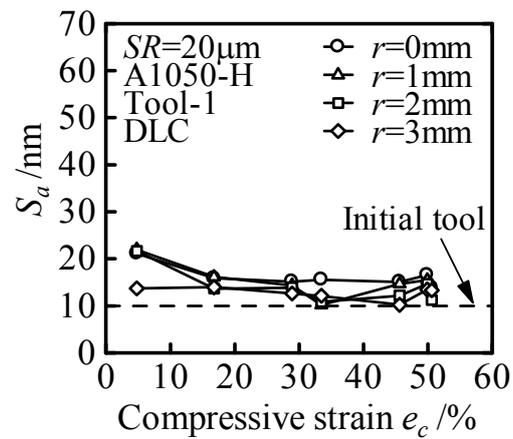


Fig.3.24 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)

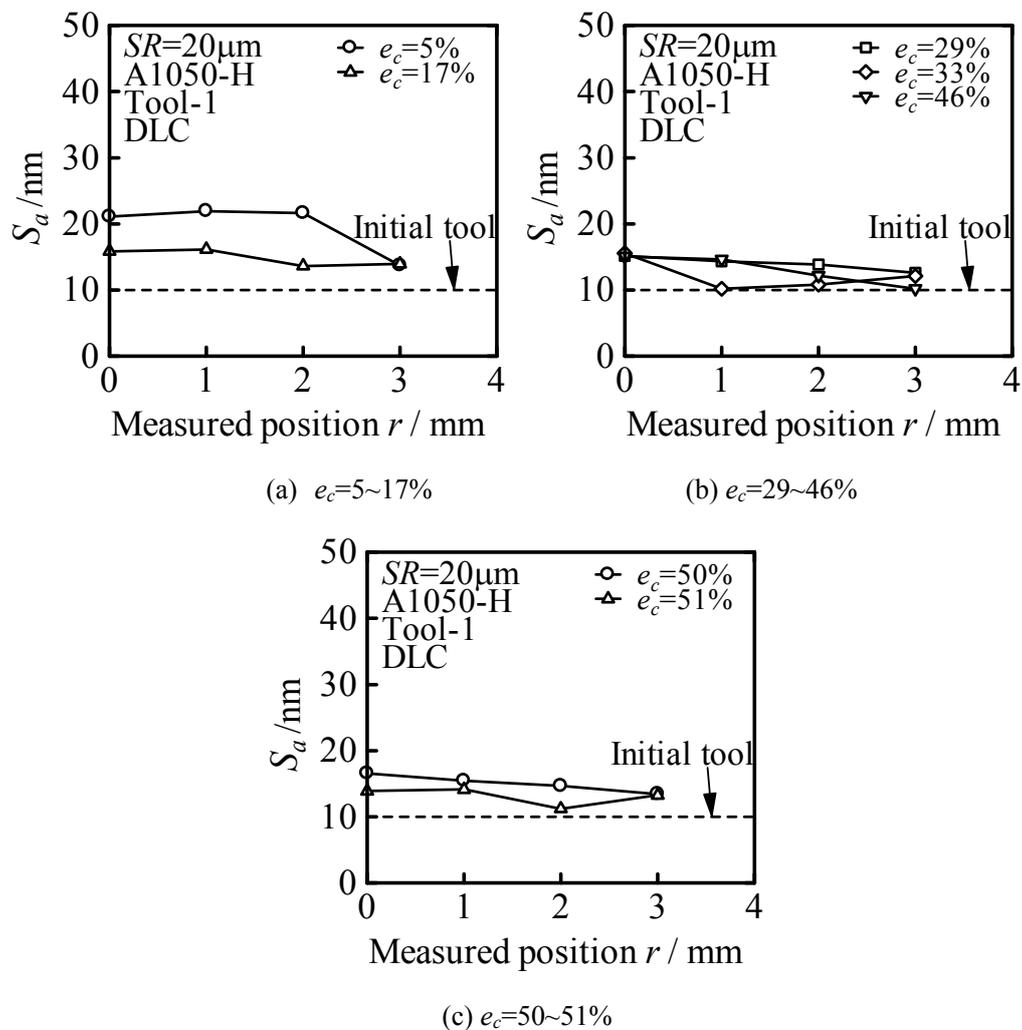


Fig.3.25 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)

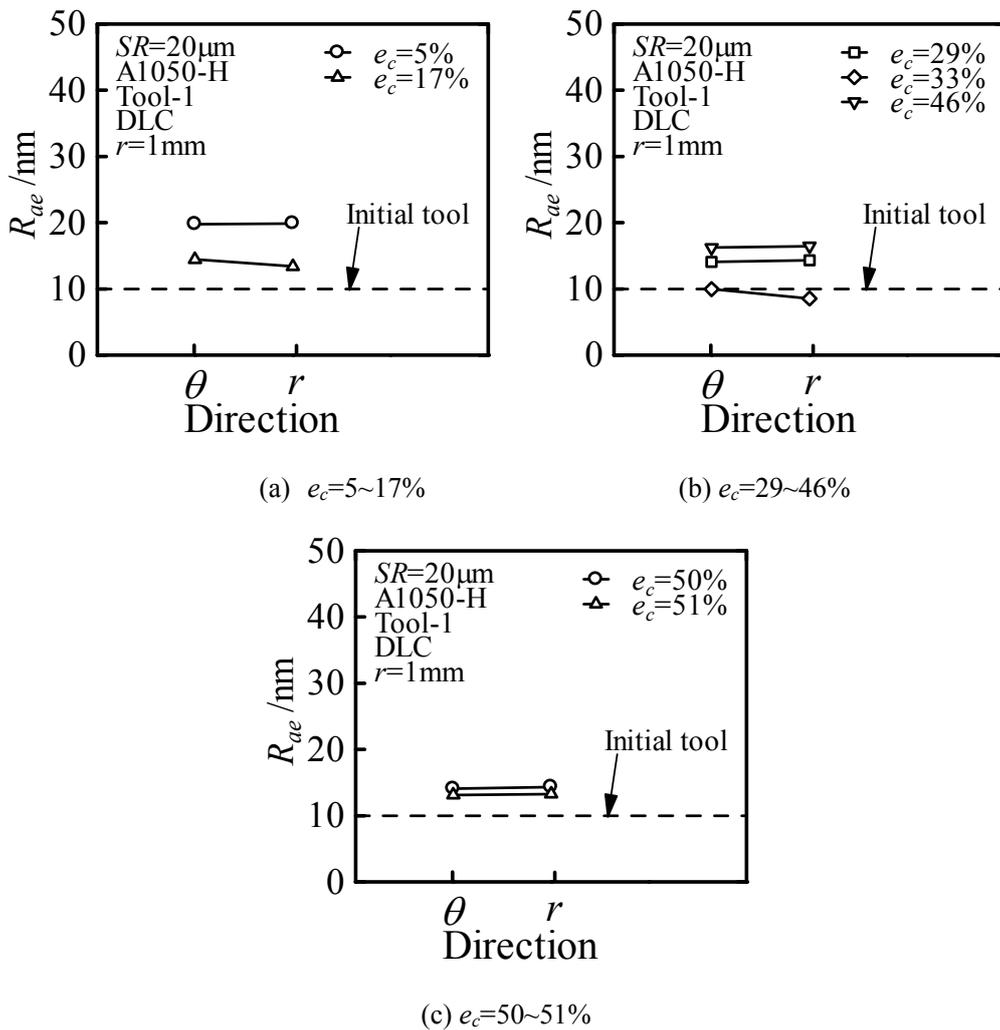


Fig.3.26 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=1\text{mm}$, DLC, Tool-1, A1050-H)

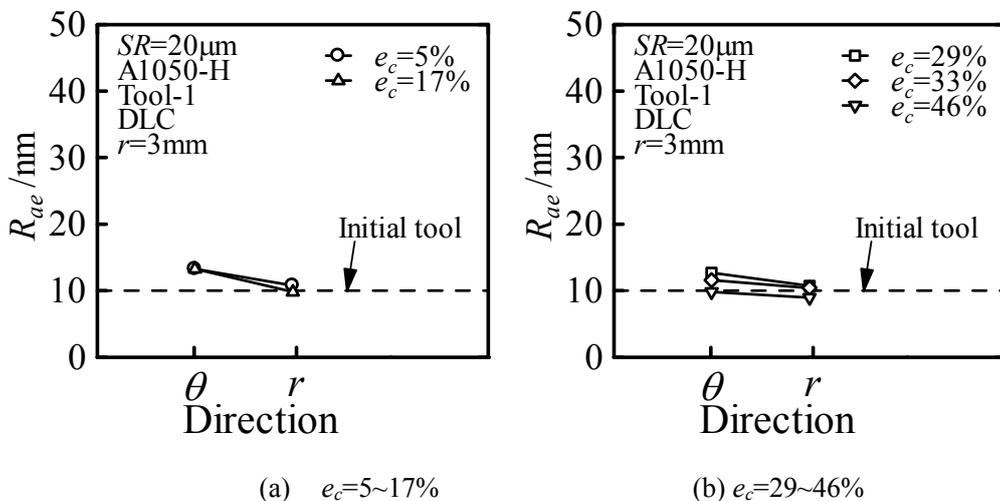
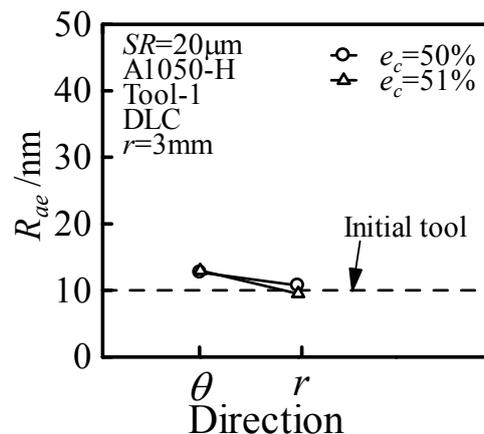


Fig.3.27 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=3\text{mm}$, DLC, Tool-1, A1050-H)

(c) $e_c=50\sim 51\%$ Fig.3.27 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=3\text{mm}$, DLC, Tool-1, A1050-H)

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.3.28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 $e_c=46\%$, 49% , 51% 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。最終荷重が一致したのものについては、実験とFEMは加工初期を除きおおむね一致している。

Fig.3.29にFEM解析による変形の様子を示す。中心部の相対すべり量は小さく、外周部ほど相対すべり量が大きくなる傾向がある。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 $0.22\sim 0.577$ 以上となっている。各実験での潤滑状態は違いがあると考えられる。

Fig.3.30にDLC, Tool-2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。どの圧縮率でも中心部は面圧が大きく、 L_S が大きくなるほど面圧が小さくなることがわかる。また、圧縮率が大きくなると面圧も大きくなることもわかる。

Fig.3.31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。低圧縮率では相対すべり量が大きいほど S_a が小さくなる傾向が見られるが、圧縮が進むと相対すべり量による S_a の違いは小さくなる。これは初期の圧縮段階では材料流動によるしごき効果で平滑化が進み、その後面圧による転写効果で中心部が平滑化されるためと考えられる。

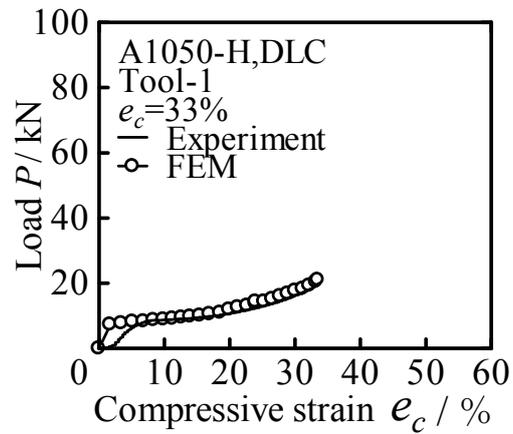
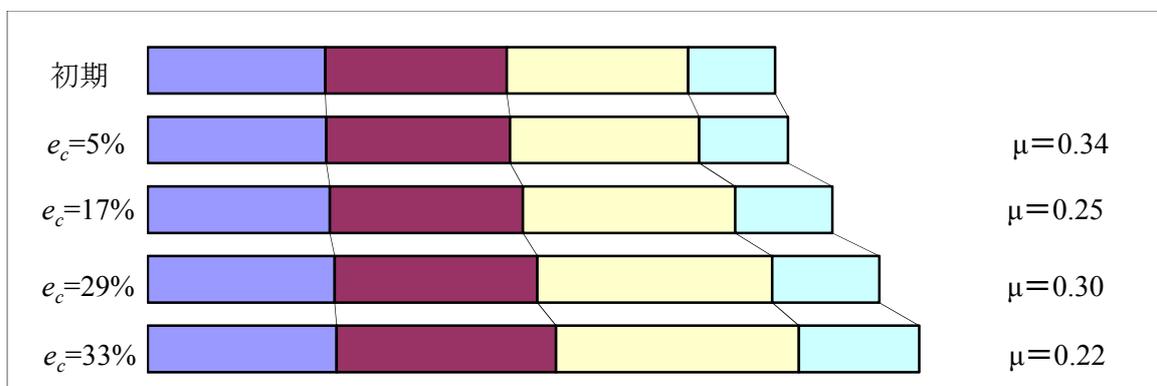
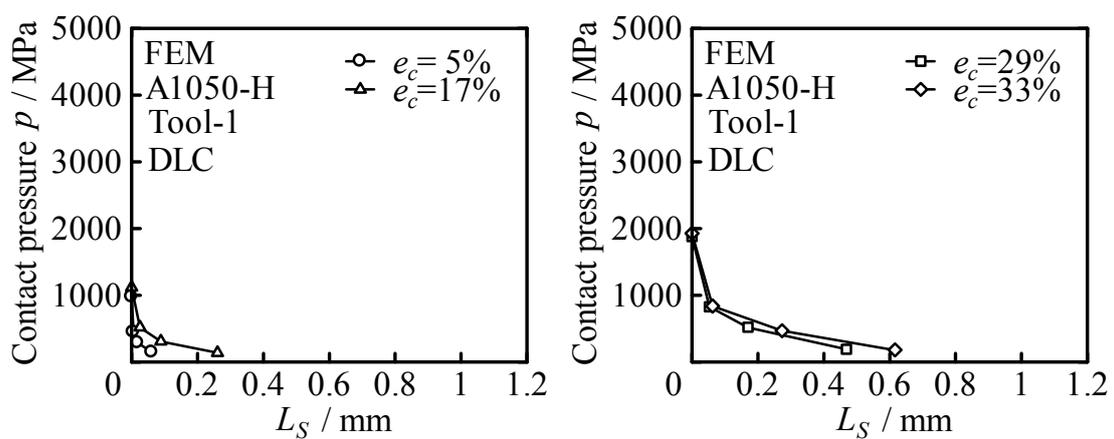
Fig.3.28 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)

Fig.3.29 FEM 解析による変形の様子

($e_c=5\%:\mu=0.34$, $e_c=17\%:\mu=0.25$, $e_c=29\%:\mu=0.30$, $e_c=33\%:\mu=0.22$)

Fig.3.30 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)

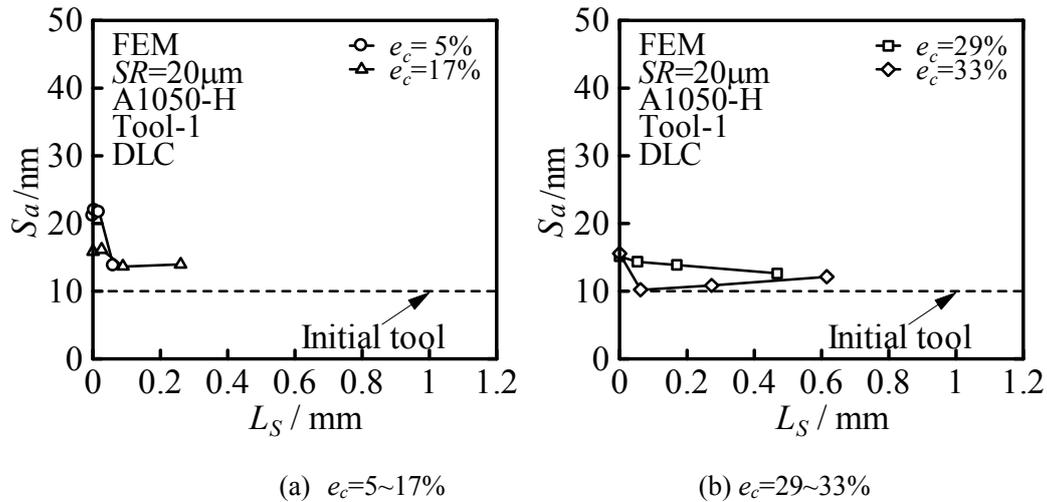


Fig.3.31 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)

3.3 DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$), A1050-H における実験結果

3.3.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.32 に圧縮前と平滑化が進んでいる圧縮率 $e_c=33\%$ 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.3.33 に圧縮後工具表面写真の例を示す. 高圧縮率の外周部で写真のように工具表面状態が悪化した様子が観察された.

Fig.3.34 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. H材を用いたため低圧縮率でも初期試験片の R_a に比べ大きく平滑化されるが, 圧縮率が大きくなっても R_a に大きな変化は見られず, 初期工具ほどの平滑度は得られなかった.

Fig.3.35 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す. 圧縮率が高くなるほど平均面圧が大きくなるのがわかる. また, 加工硬化により初期の変形抵抗の大きい H 材を用いているため, 加工初期の段階でも平均面圧が大きくなっている.

Fig.3.36 に荷重 P とレコーダー出力変位 S_r の関係を示す. 圧縮率による曲線の違いは見られず, ほぼ同じ荷重, 変位で圧縮されていることがわかる.

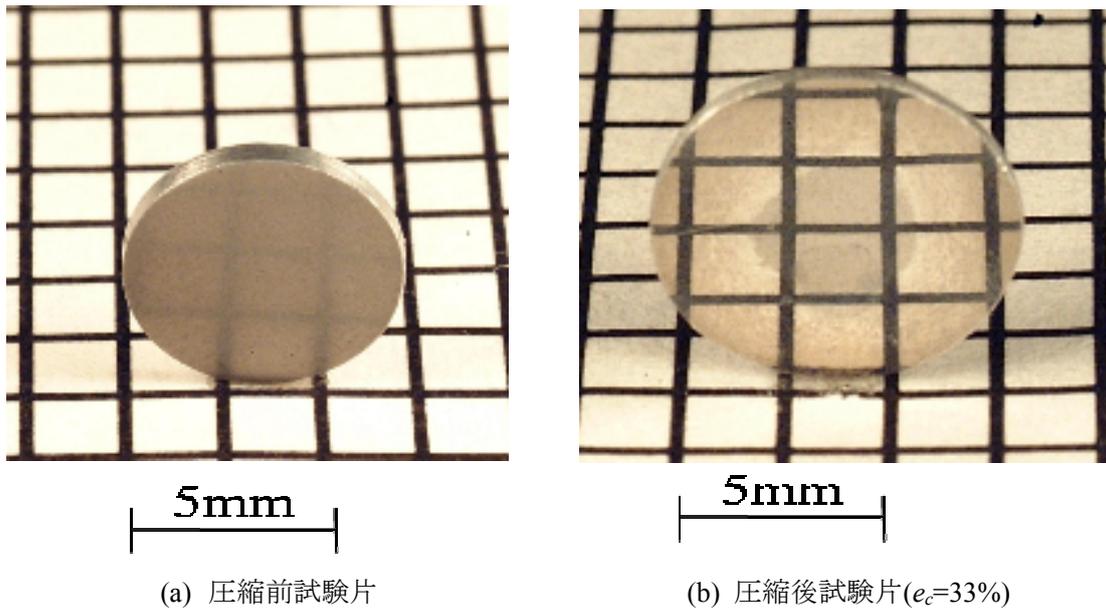


Fig.3.32 圧縮前後の試験片の外観 (DLC, Tool-2, A1050-H)

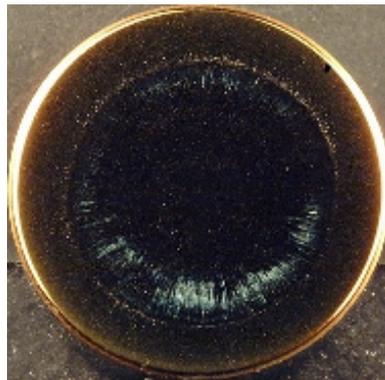


Fig.3.33 圧縮後工具表面 (DLC, Tool-2, A1050-H, $e_c=54\%$)

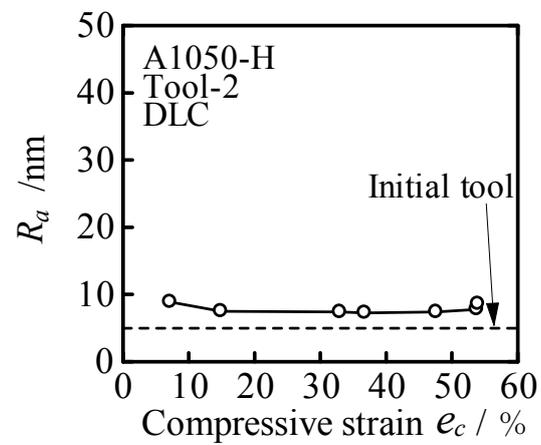


Fig.3.34 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

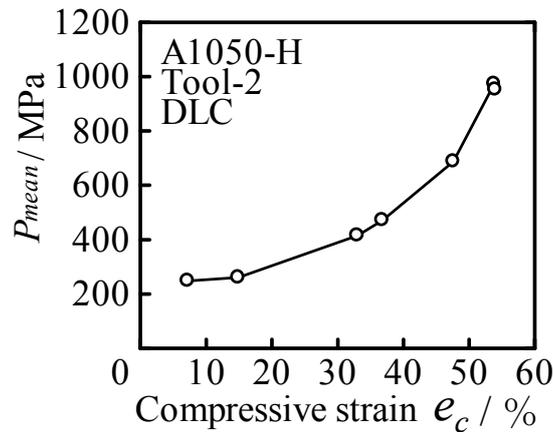


Fig.3.35 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

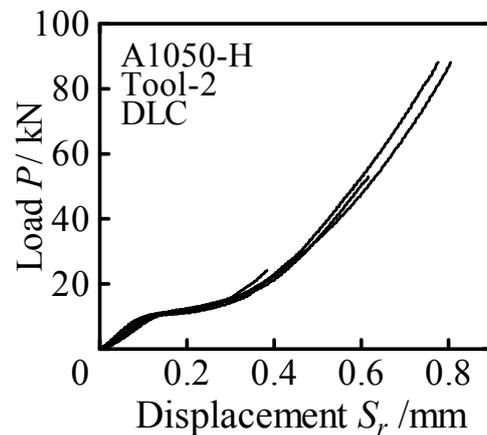


Fig.3.36 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

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.3.37 に試験片初期表面の AFM 像を、Fig.3.38 に $e_c=40\%$ に圧縮した試験片の AFM 像を示す。画像より、外周部で平滑化が進んでいる様子がわかる。また、外周部では材料流動した様子も見られる。

Fig.3.39 に算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。低圧縮率でも初期試験片に比べ大きく平滑化され、圧縮率が大きいほど平滑化されるが、初期工具ほどの平滑度は得られなかった。また 50% を超えると S_a が大きくなる様子も見られる。

Fig.3.40 に算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。圧縮率が 40% 程度までは中心部より外周部で平滑化されていることがわかる。高圧縮率では中心部も外周部と同程度まで平滑化される。

Fig.3.41 に測定箇所 $r=1\text{mm}$ 、Fig.3.42 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。 $r=1\text{mm}$ では僅かに θ 方向よりも r 方向の方が R_{ae} が小さくなる傾向が

あるが、 $r=3\text{mm}$ に比べ、大きな違いは見られない。対して $r=3\text{mm}$ では θ 方向よりも r 方向の方が R_{ae} が小さくなる傾向があり、圧縮率が小さいところでその傾向が大きい。 r 方向に材料が流動するため、より r 方向に平滑化されるが、圧縮率が大きくなると面圧による転写効果で中心部も平滑化されるためと考えられる。

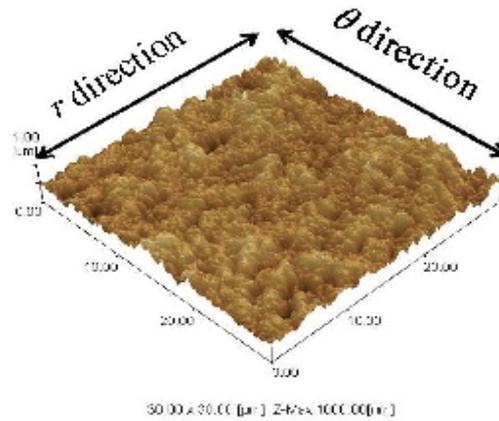
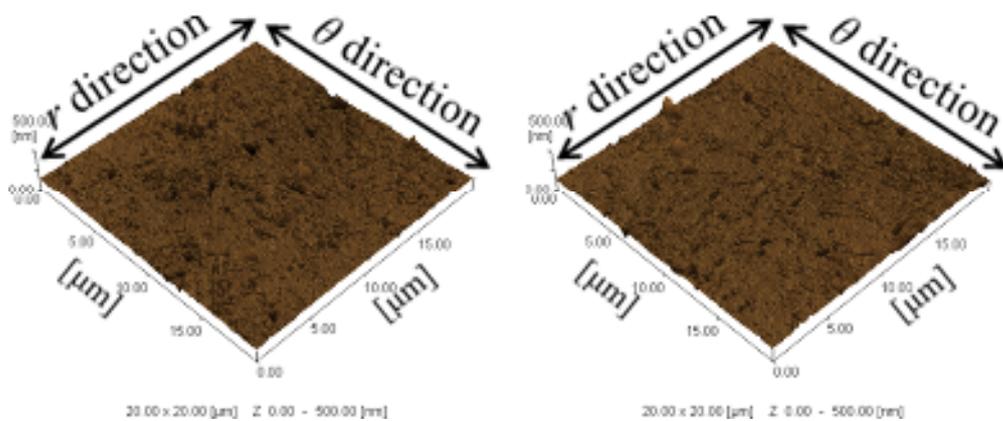


Fig.3.37 試験片初期工具の AFM 像の例
($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)



(a) 測定箇所 $r=0\text{mm}$

(b) 測定箇所 $r=1\text{mm}$

Fig.3.38 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像の例
($e_c=33\%$, $SR=20\mu\text{m}$, DLC, Tool-2, A1050-H)

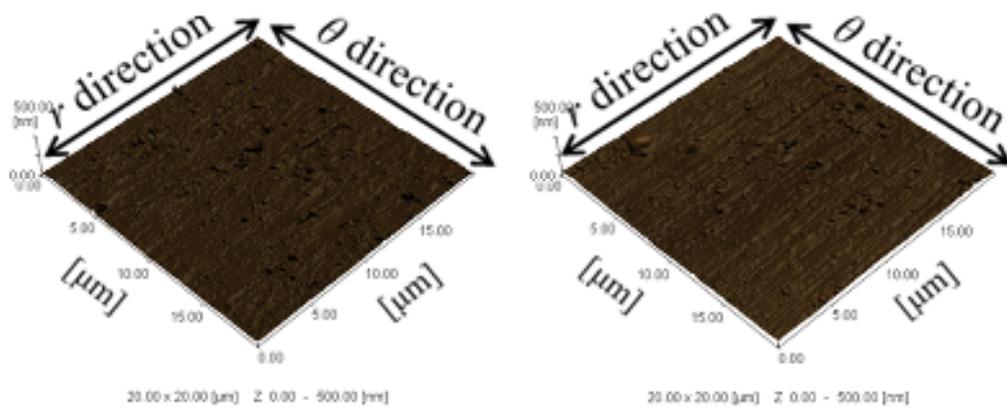
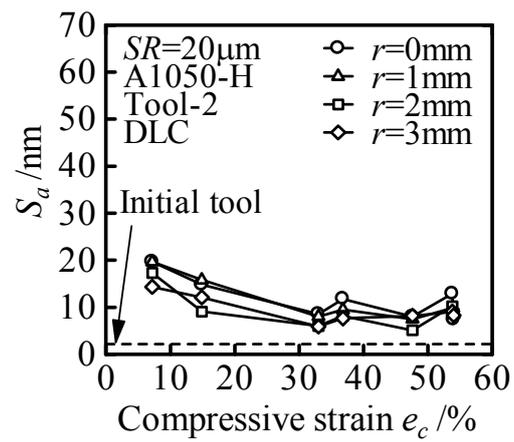
(c) 測定箇所 $r=2\text{mm}$ (d) 測定箇所 $r=3\text{mm}$

Fig.3.38 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像の例

(e_c=33%, SR=20μm, DLC, Tool-2, A1050-H)Fig.3.39 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

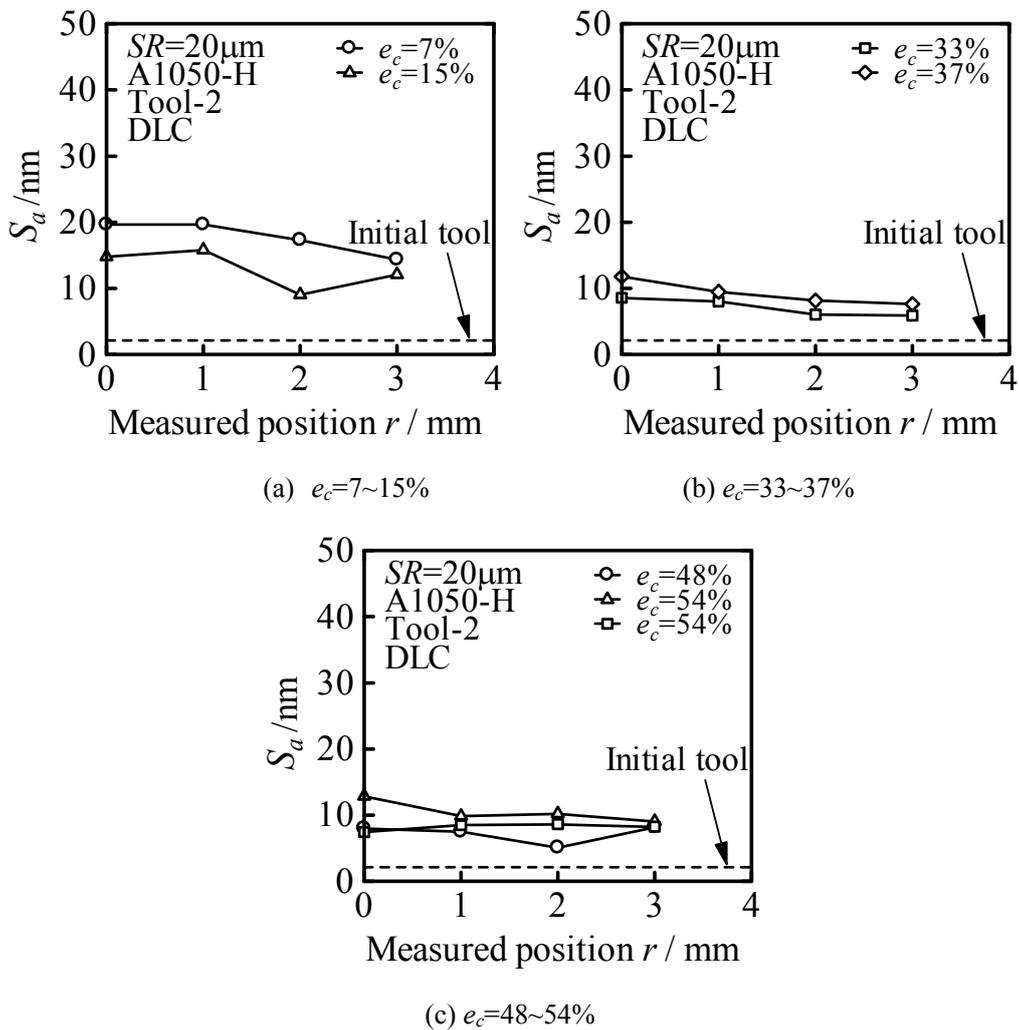


Fig.3.40 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

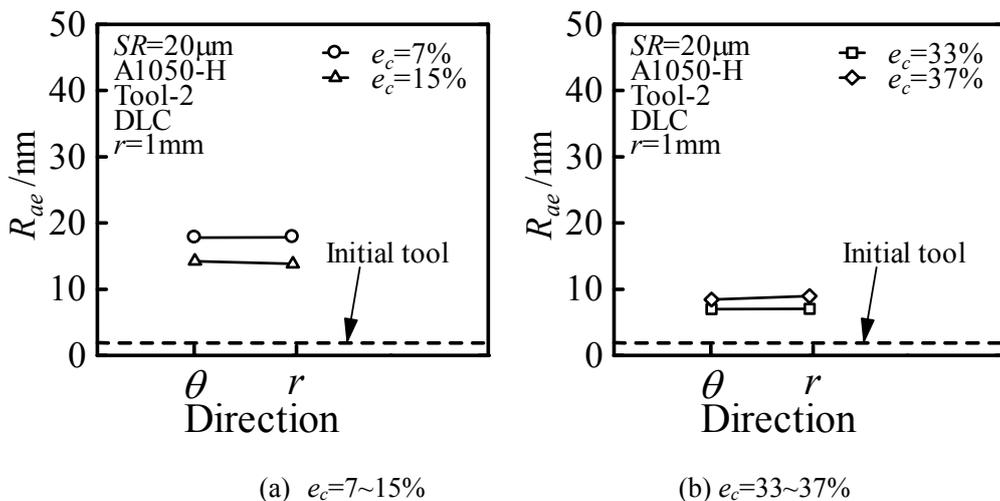
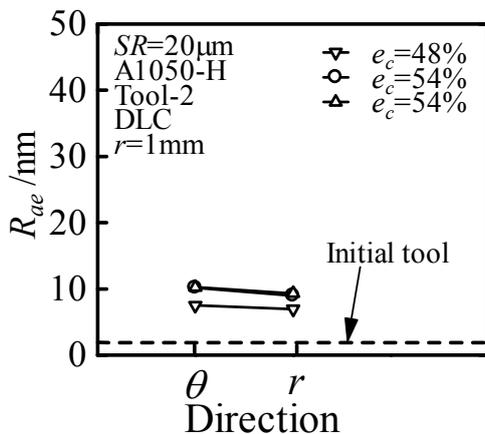
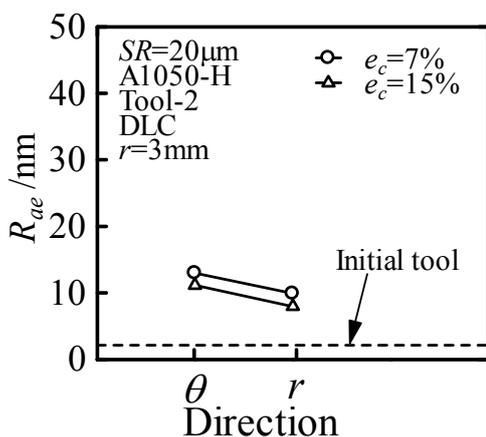
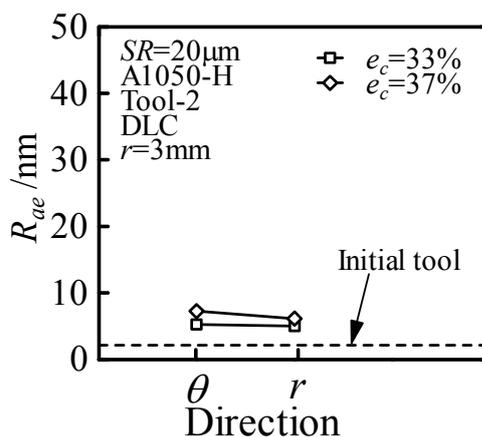
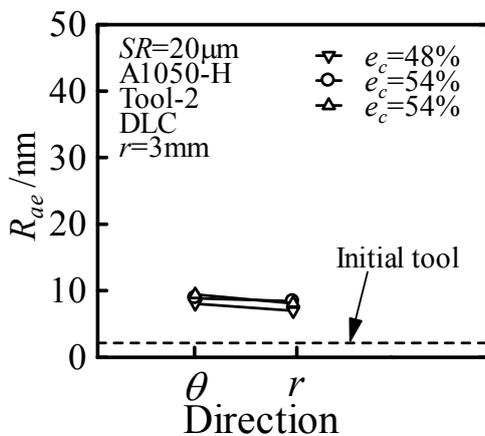


Fig.3.41 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=1\text{mm}$, DLC, Tool-2, A1050-H)

(c) $e_c=48\sim54\%$ Fig.3.41 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=1\text{mm}$, DLC, Tool-2, A1050-H)(a) $e_c=7\sim15\%$ (b) $e_c=33\sim37\%$ (c) $e_c=48\sim54\%$ Fig.3.42 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=3\text{mm}$, DLC, Tool-2, A1050-H)

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.3.43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 $e_c=54\%$ 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。実験とFEMはおおむね一致している。

Fig.3.44にFEM解析による変形の様子を示す。中心部の相対すべり量は小さく、外周部ほど相対すべり量が大きくなる傾向がある。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 $0.28\sim 0.577$ 以上となっている。各実験での潤滑状態は違いがあると考えられる。

Fig.3.45にDLC, Tool-2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。どの圧縮率でも中心部は面圧が大きく、 L_S が大きくなるほど面圧が小さくなることがわかる。また、圧縮率が大きくなると面圧も大きくなることもわかる。

Fig.3.46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。低圧縮率では相対すべり量が大きいほど S_a が小さくなる傾向が見られるが、圧縮が進むと相対すべり量による S_a の違いは小さくなる。これは初期の圧縮段階では材料流動によるしごき効果で平滑化が進み、その後面圧による転写効果で中心部が平滑化されるためと考えられる。

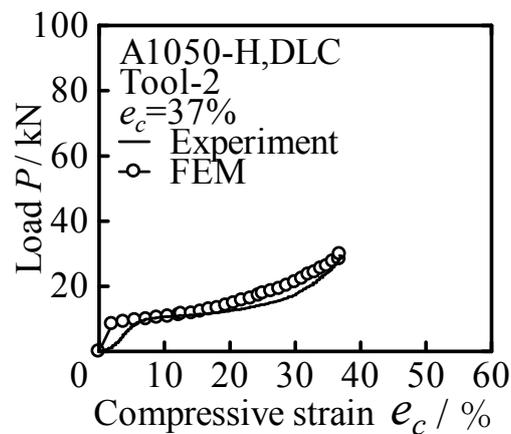


Fig.3.43 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

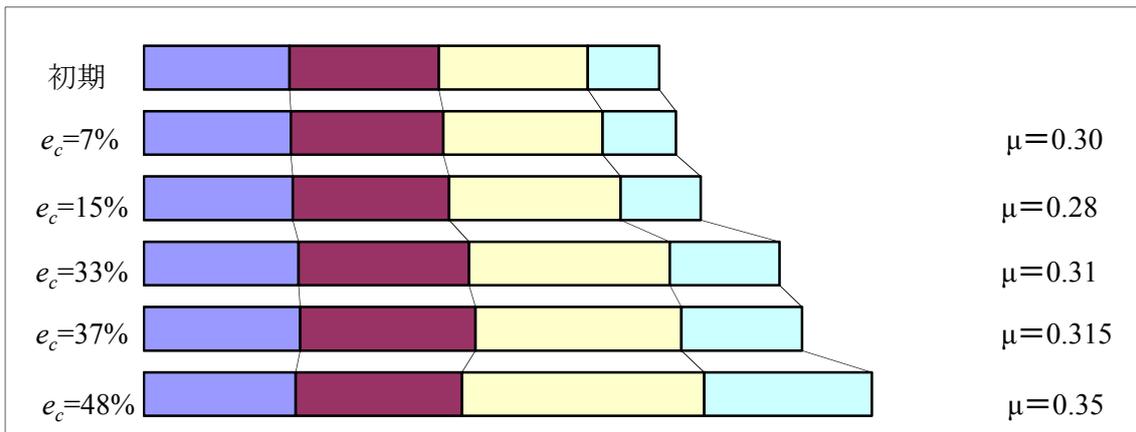
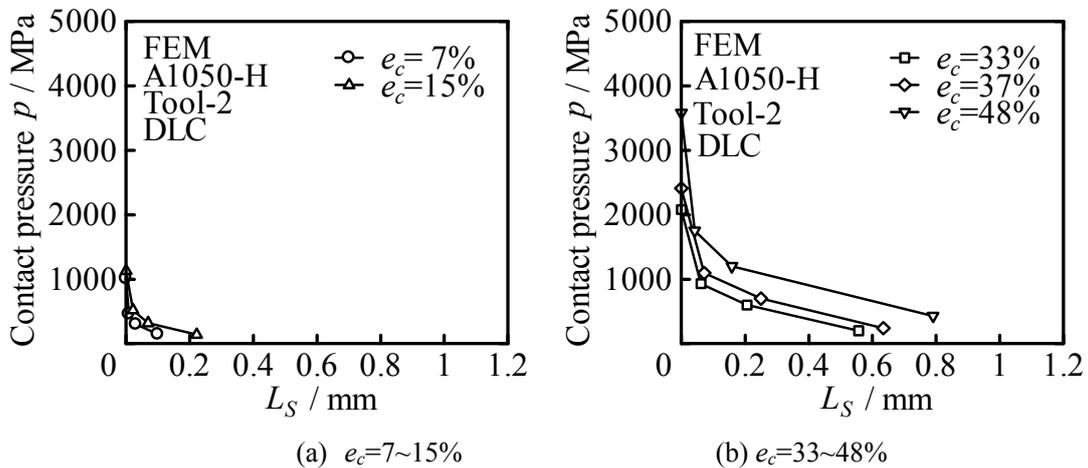
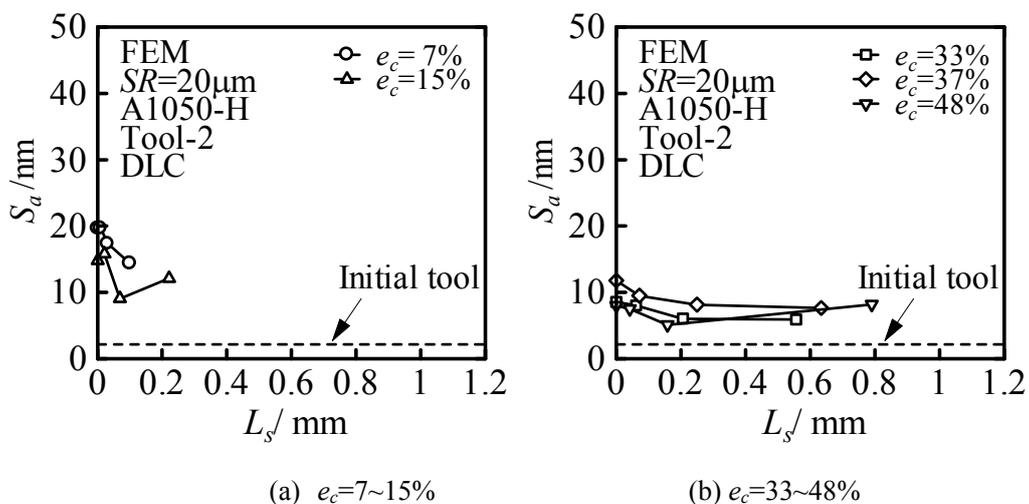


Fig.3.44 FEM 解析による変形の様子

($e_c=7\%:\mu=0.30$, $e_c=15\%:\mu=0.28$, $e_c=33\%:\mu=0.31$, $e_c=37\%:\mu=0.315$, $e_c=48\%:\mu=0.35$)

Fig.3.45 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)Fig.3.46 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

3.4 DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$), A1050-O における実験結果

3.4.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.47 に圧縮前と平滑化が進んでいる圧縮率 $e_c=47\%$ 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.3.48 に圧縮後工具表面写真の例を示す。高圧縮率の外周部で写真のように工具表面状態が悪化した様子が観察された。

Fig.3.49 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。圧縮率が高くなると R_a は小さくなる傾向があるが、初期工具の R_a ほどには平滑化されない。

Fig.3.50 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率 e_c が大きくなると平均面圧 p_{mean} も大きくなるのがわかる。

Fig.3.51 に荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係を示す。 S_r が 0.2mm を超えた辺りで曲線が 2 通りに分かれる傾向がある。これは、DLC コーティングの状態のわずかな違いによるものであると考えられる。

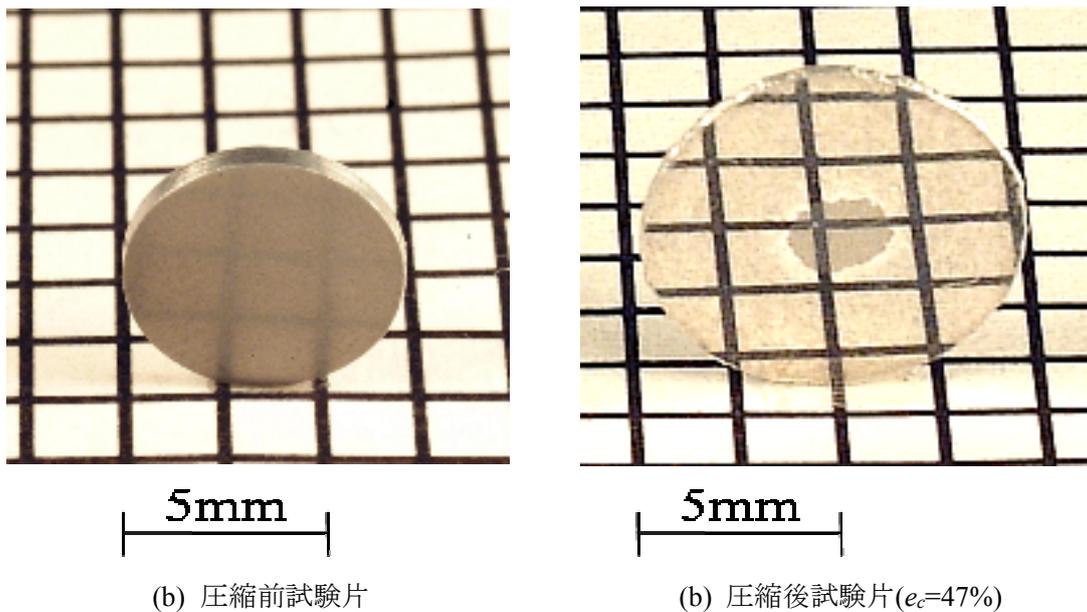


Fig.3.47 圧縮前後の試験片の外観 (DLC, Tool-2, A1050-O)

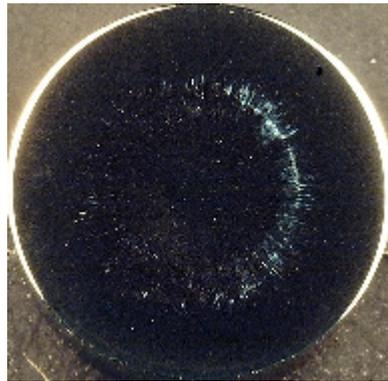


Fig.3.48 圧縮後工具表面 (DLC, Tool-2, A1050-O, $e_c=52\%$)

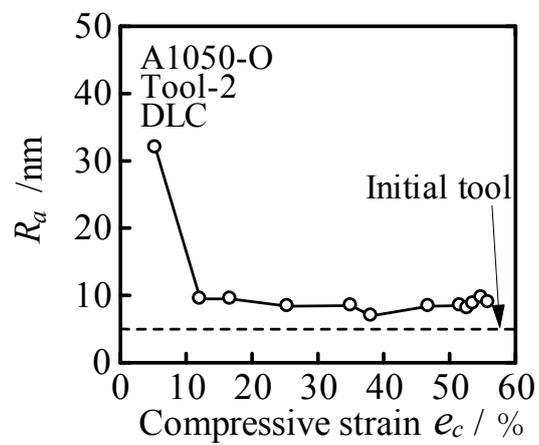


Fig.3.49 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)

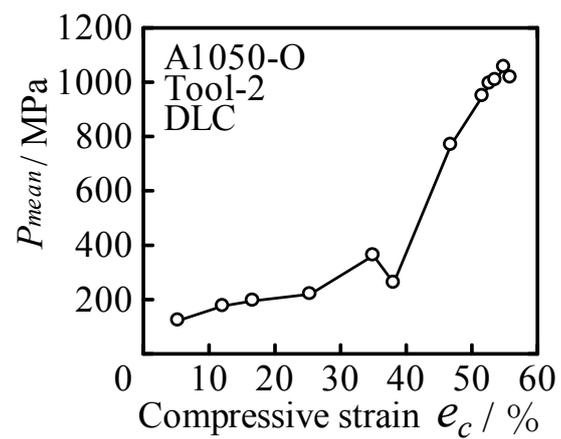


Fig.3.50 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)

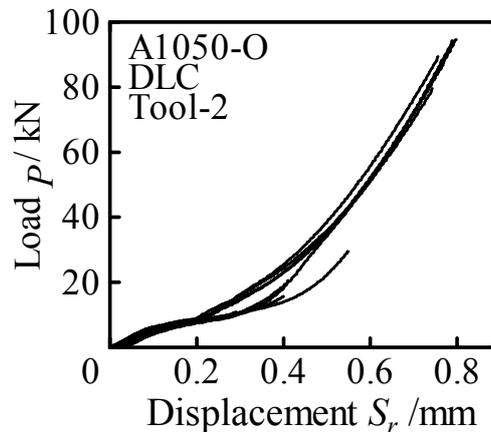


Fig.3.51 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)

3.4.2 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.3.52 に試験片初期表面の AFM 像を、Fig.3.53 に $e_c=46.8\%$ に圧縮した試験片の AFM 像を示す。画像より、外周部で平滑化が進んでいる様子がわかる。また、外周部では材料流動した様子も見られる。

Fig.3.54 に算術平均面粗さ 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 S_a は小さくなる傾向があるが、高圧縮率の外周部では S_a が大きくなる。低圧縮率で中心部より外周部の方が S_a が小さくなる傾向もある。主に中心部では転写効果が、外周部ではしごき効果が影響して平滑化すると考えられるが、面圧のそれほど大きくない低圧縮率では潤滑状態が良く中心部での転写効果よりも外周部でのしごき効果による影響が大きかったのではないかと考えられる。

Fig.3.55 に算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。圧縮率が 50% までは外周部ほど平滑化が進む傾向があるが、50% を超えると中心部でも平滑化が進み、外周部では S_a が大きくなる傾向がある。これは実験後工具を観察したところ、外周部で工具表面状態が悪くなっている様子が観察された。そのため外周部の S_a が大きくなったと考えられる。

Fig.3.56 に測定箇所 $r=1\text{mm}$ 、Fig.3.57 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。中心部に近い $r=1\text{mm}$ では測定方向による大きな違いは見られない。 $r=3\text{mm}$ では、 θ 方向より r 方向の R_{ae} の方が小さくなる傾向がある。これは r 方向に材料が流動するため、しごき効果によりその方向に平滑化されたと考えられる。

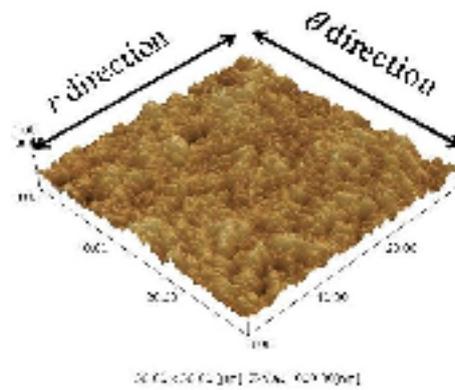
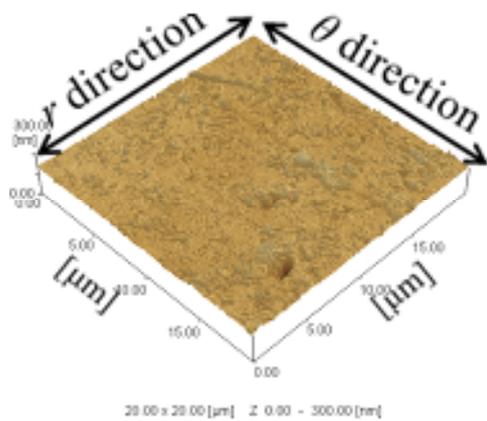
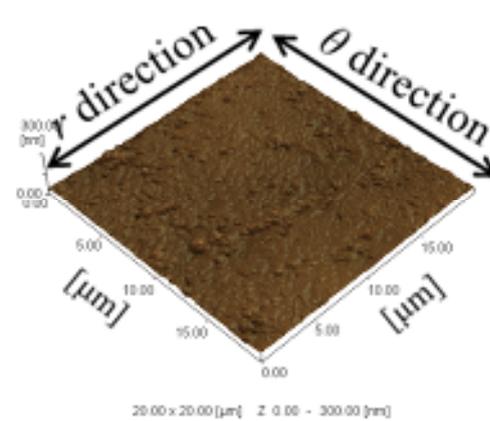


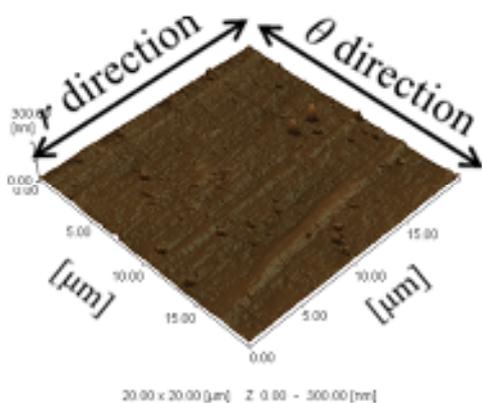
Fig.3.52 試験片初期工具の AFM 像の例
($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)



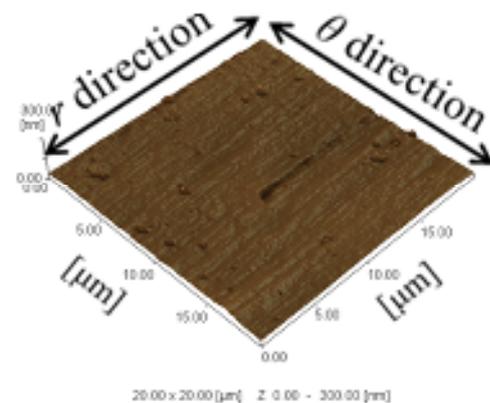
(a) 測定箇所 $r=0\text{mm}$



(b) 測定箇所 $r=1\text{mm}$



(c) 測定箇所 $r=2\text{mm}$



(d) 測定箇所 $r=3\text{mm}$

Fig.3.53 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像の例
($e_c=46.8\%$, $SR=20\mu\text{m}$, DLC, Tool-2, A1050-O)

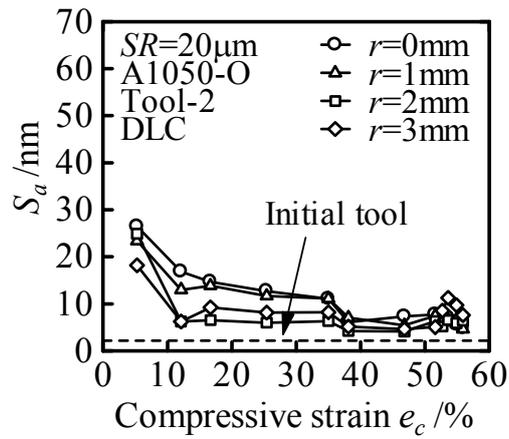
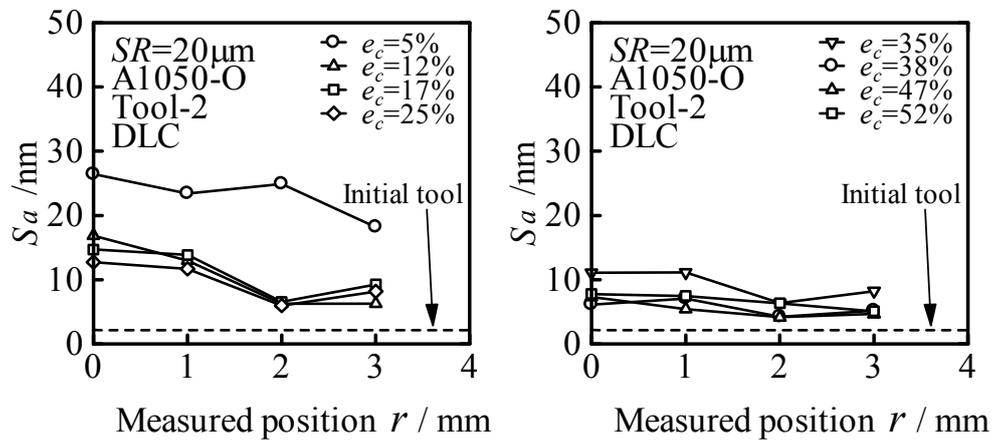
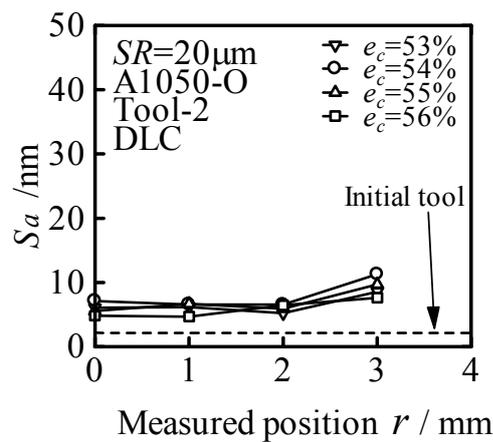


Fig.3.54 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)



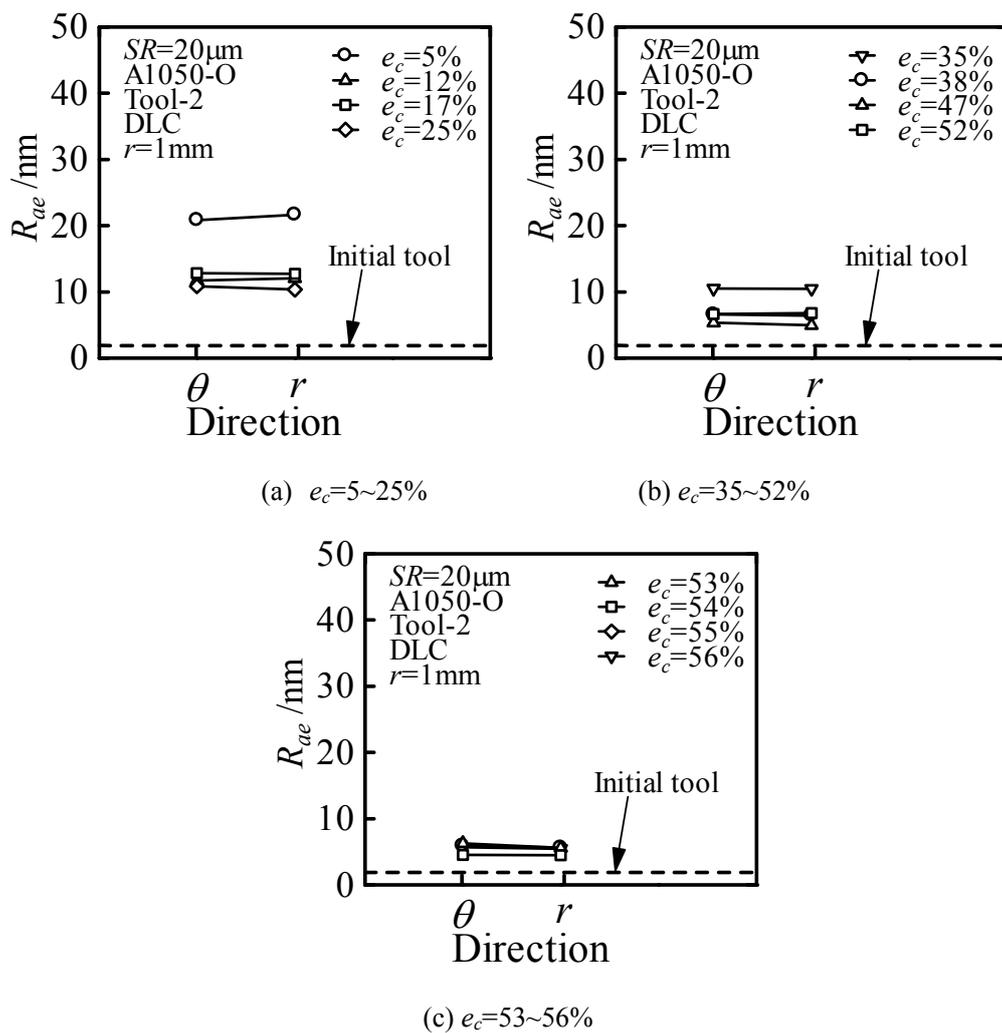
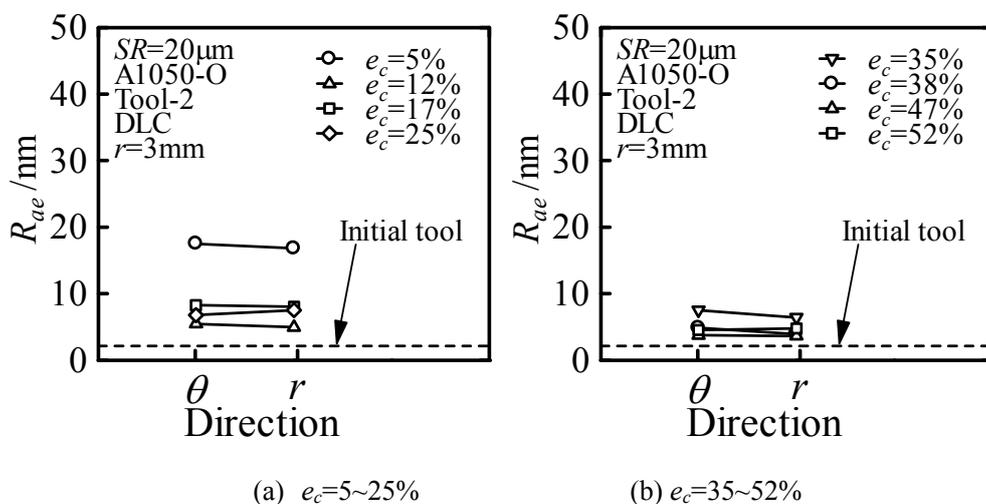
(a) $e_c=5\sim 25\%$

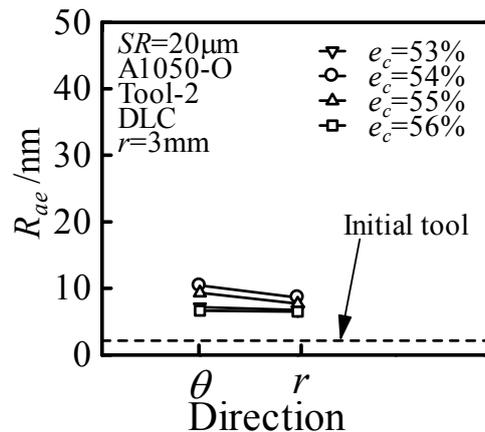
(b) $e_c=35\sim 52\%$



(c) $e_c=53\sim 56\%$

Fig.3.55 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)

Fig.3.56 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=1\text{mm}$, DLC, Tool-2, A1050-O)Fig.3.57 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=3\text{mm}$, DLC, Tool-2, A1050-O)

(c) $e_c=53\sim 56\%$ Fig.3.57 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=3\text{mm}$, DLC, Tool-2, A1050-O)

3.4.3 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.3.58 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 $e_c=52\%$, 53% , 54% , 55% , 56% 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。実験と FEM はおおむね一致している。

Fig.3.59 に FEM 解析による変形の様子を示す。中心部の相対すべり量は小さく、外周部ほど相対すべり量が大きくなる傾向がある。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 $0.145\sim 0.577$ 以上となっている。各実験での潤滑状態は違いがあると考えられる。

Fig.3.60 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。どの圧縮率でも中心部は面圧が大きく、 L_S が大きくなるほど面圧が小さくなることわかる。また、圧縮率が大きくなると面圧も大きくなることもわかる。

Fig.3.61 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。低圧縮率では相対すべり量が大きいほど S_a が小さくなる傾向が見られるが、圧縮率 $e_c=30\%$ を超えると相対すべり量による S_a の大きな違いは見られなくなる。これは初期の圧縮段階では材料流動によるしごき効果で平滑化が進み、その後面圧による転写効果で中心部が平滑化されるためと考えられる。

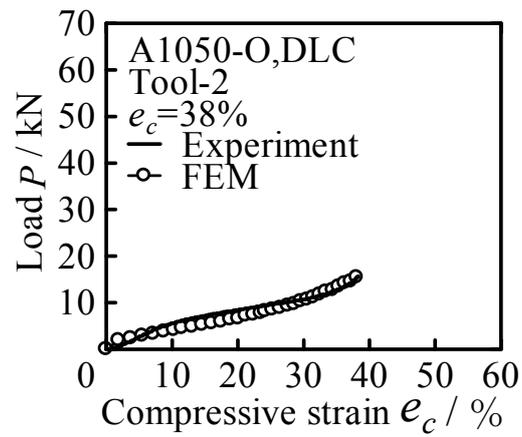


Fig.3.58 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)

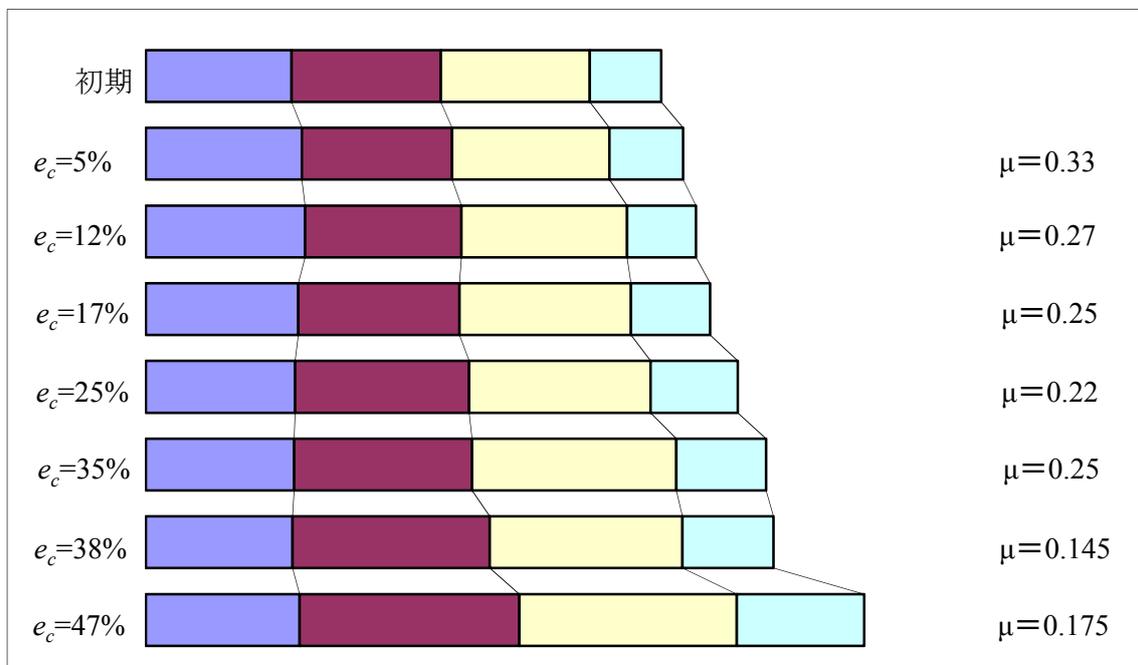
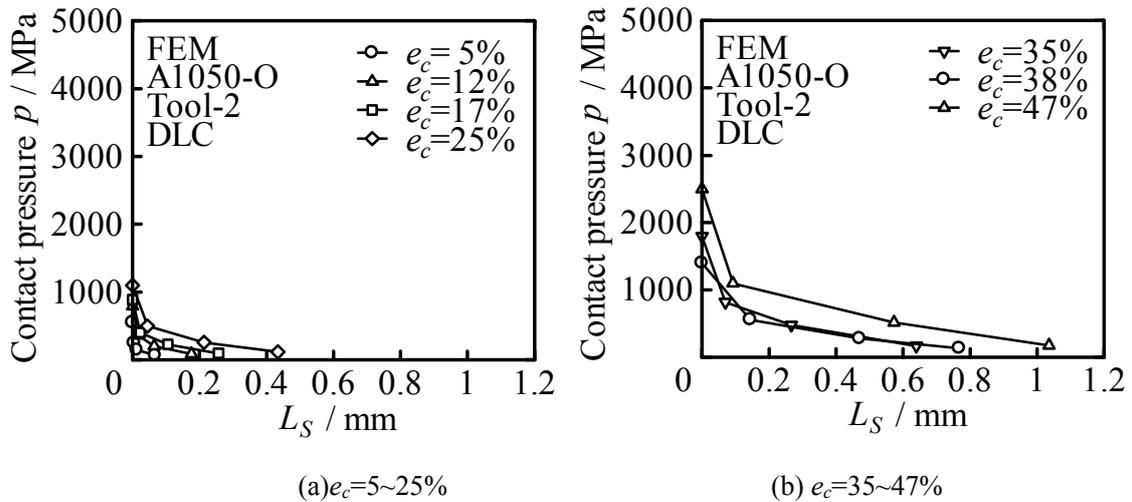
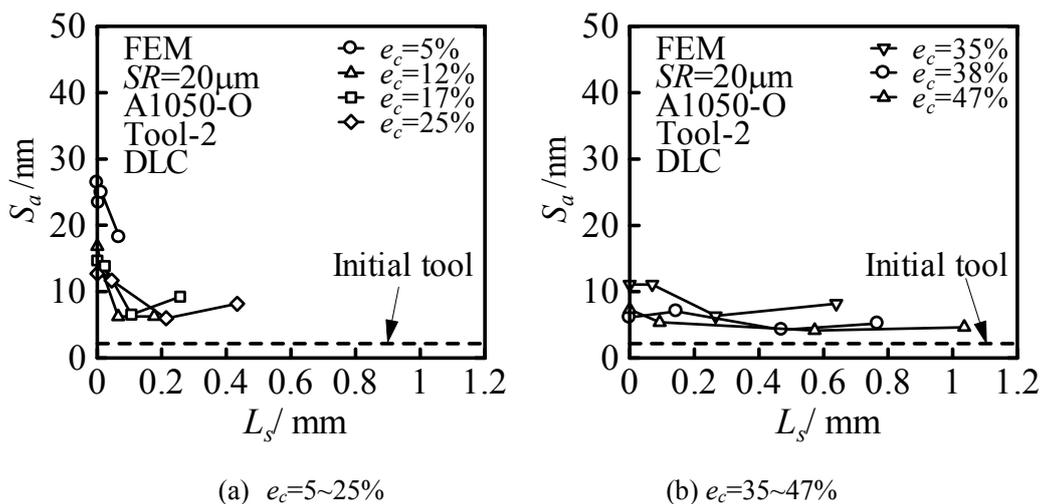


Fig.3.59 FEM 解析による変形の様子

($e_c=5\%:\mu=0.33$, $e_c=12\%:\mu=0.27$, $e_c=17\%:\mu=0.25$, $e_c=25\%:\mu=0.22$,
 $e_c=35\%:\mu=0.25$, $e_c=38\%:\mu=0.145$, $e_c=47\%:\mu=0.175$)

Fig.3.60 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)Fig.3.61 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)

3.5 工具表面粗さの違いによる影響

3.5.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.62 に各条件で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。いずれの条件でも明らかに Tool-2 の方が平滑化されていることがわかる。また、Tool-1 では初期工具と同程度の平滑度が得られるが、Tool-2 では初期工具ほどの平滑度が得られていないことがわかる。

Fig.3.63 に各条件での平均面圧 p_{meant} と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれも圧縮率 e_c が大きくなると平均面圧 p_{meant} も高くなることがわかる。また、低圧縮率ではどの条件でも Tool-1, Tool-2 で違いは見られないが、高圧縮率では O 材, DLC を除いた 3 条件で Tool-1 の方が平均面圧が高いことがわかる。

Fig.3.64 に高圧縮率の実験後の工具表面を示す。それぞれ圧縮後工具表面に剥離など工具表面状態が悪化した様子が見られるが、O 材、Tool-1、DLC ではその様子があまり見られない。このことから高圧縮率では剥離などの工具表面状態の悪化による影響で平均面圧は高くなることが考えられる。

Fig.3.65 に各条件での荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係を示す。 p_{mean} と同様に高圧縮率で O 材、DLC を除いた 3 条件で Tool-1 の方が荷重が高い傾向が見られる。荷重 P も p_{mean} と同様な理由であると考えられる。

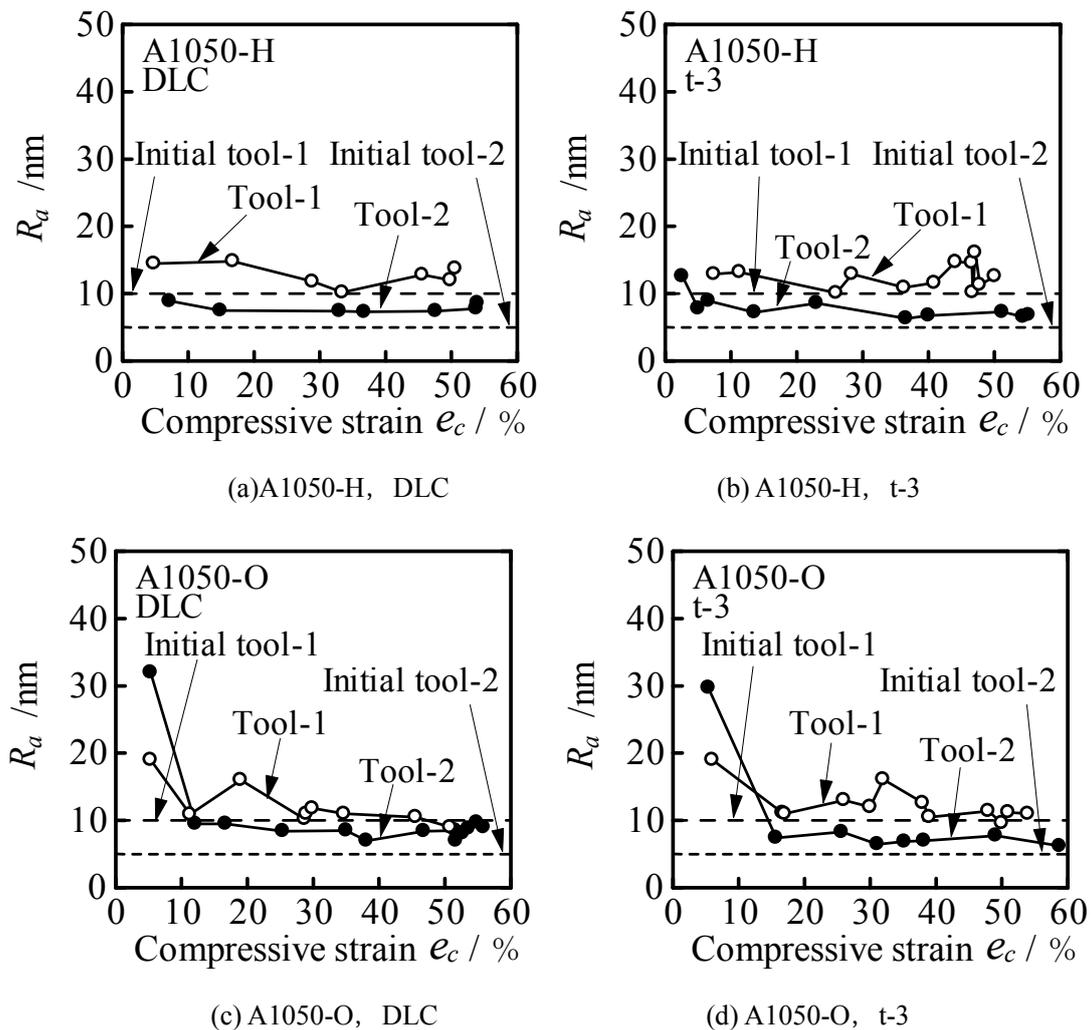


Fig.3.62 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係

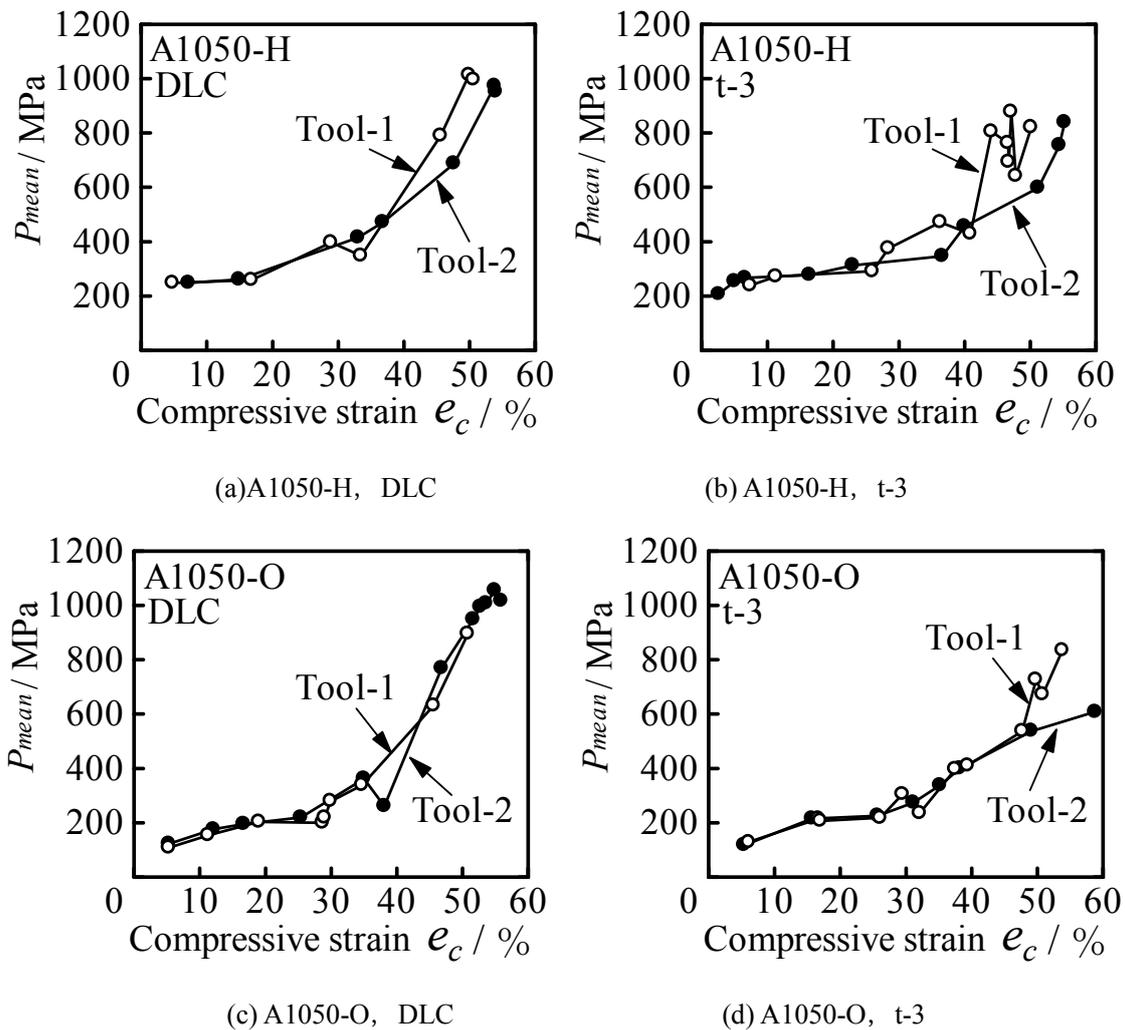


Fig.3.63 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係

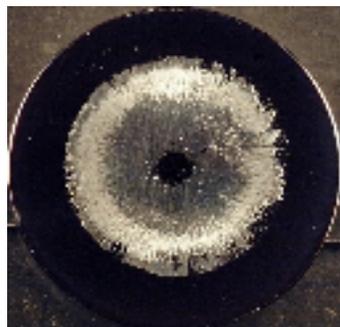
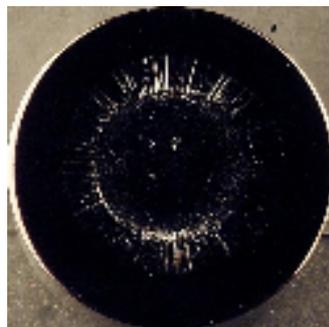
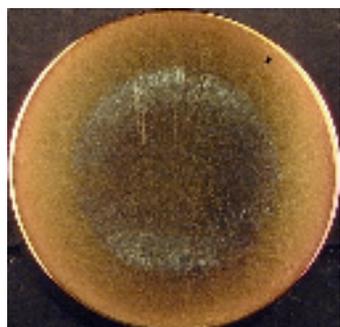
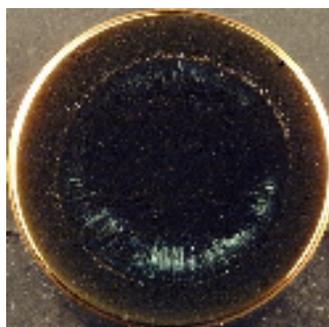
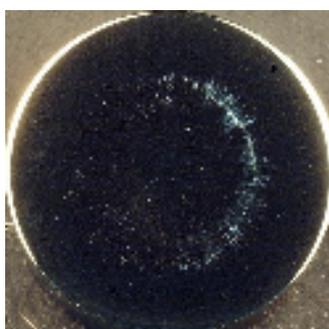
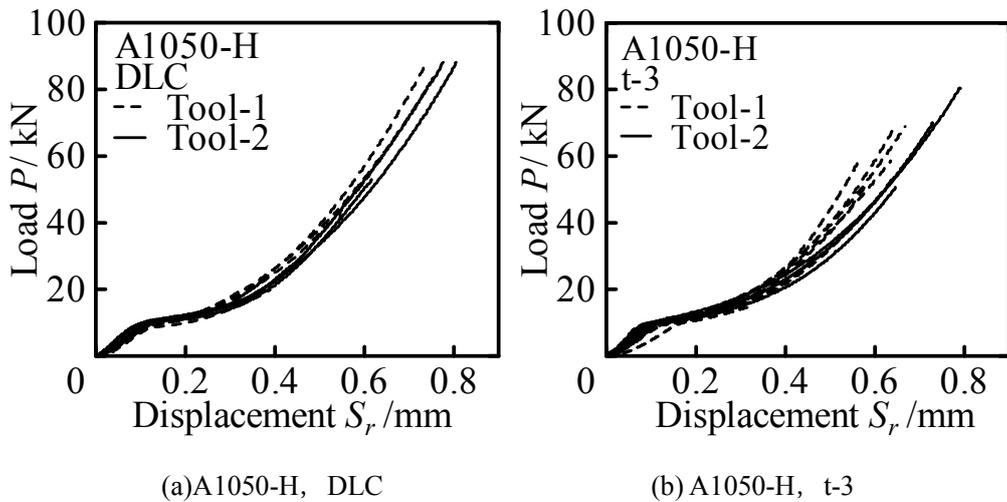
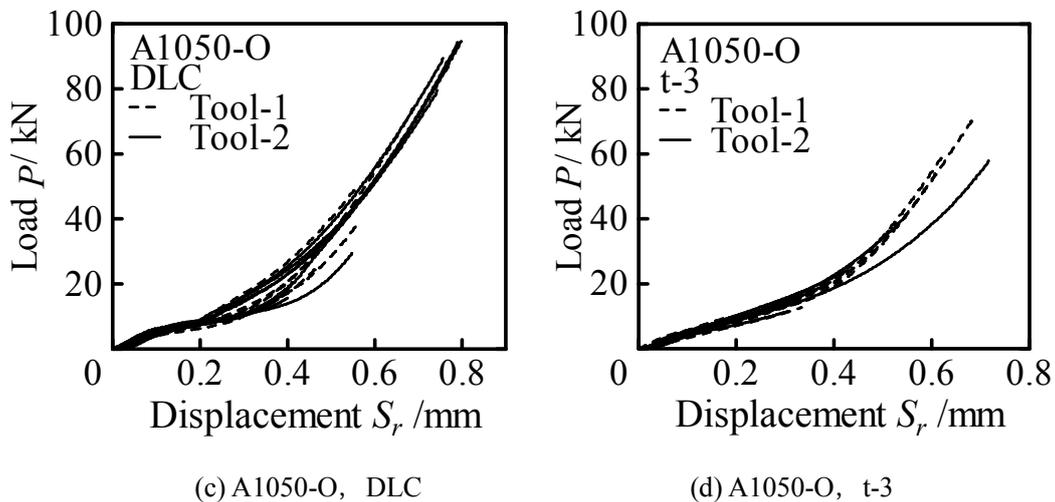
(a) t-3, Tool-1, A1050-H, $e_c=50\%$ (b) t-3, Tool-2, A1050-H, $e_c=51\%$ (c) DLC, Tool-1, A1050-H, $e_c=51\%$ (d) DLC, Tool-2, A1050-H, $e_c=54\%$ (e) t-3, Tool-1, A1050-O, $e_c=50\%$ (f) t-3, Tool-2, A1050-O, $e_c=49\%$ (g) DLC, Tool-1, A1050-O, $e_c=51\%$ (h) DLC, Tool-2, A1050-O, $e_c=52\%$

Fig.3.64 圧縮後工具表面

Fig.3.65 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係Fig.3.65 荷重 P とレコーダ出力変位 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.3.66 に DLC, 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. いずれの箇所も低圧縮率でも初期試験片に比べ大きく平滑化され, 圧縮率が大きいほど平滑化される傾向が見られる. また, 明らかに Tool-1 より Tool-2 の方が平滑化されるが, Tool-1 は $r=0\text{mm}$ を除く箇所で初期工具と同等まで平滑化されるのに対し, Tool-2 は初期工具ほどの平滑度は得られていないことがわかる. また 50%を超えると S_a が大きくなる傾向も見られる.

Fig.3.67 に t-3, 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. 他の条件と同様に, いずれの箇所も低圧縮率でも初期試験片に比べ大きく平滑化され, 圧縮率が大きいほど平滑化される傾向が見られる. また, 明らかに Tool-1 より Tool-2 の方が平滑化され, どちらも圧縮率が 30%前後で最も平滑化されて

いることがわかる。また Tool-2 は高圧縮率の外周部で、Tool-1 は高圧縮率で S_a が大きくなる場合があるがこれは剥離による影響のためと考えられる。

Fig.3.68 に DLC, A1050-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。他の条件と同様に、圧縮率が大きいほど平滑化され、明らかに Tool-1 より Tool-2 の方が平滑化されているが、Tool-1 は初期工具と同程度の平滑度が得られているのに対し Tool-2 は初期工具ほどには平滑化されていないことがわかる。またどちらも圧縮率が 40%以上で最も平滑化されるが Tool-2 の外周部では S_a が大きくなる傾向が見られる。

Fig.3.69 に t-3, A1050-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。他の条件と同様に、圧縮率が大きいほど平滑化され、Tool-1 より Tool-2 の方が平滑化されていることがわかる。低圧縮率では Tool-1 の S_a が Tool-2 よりも小さくなっているが、加工初期であるため工具表面粗さの影響が少ないためと考えられる。また、高圧縮率で t-3, A1050-H ほど S_a が大きくなる様子は見られなかったため、t-3, A1050-H ほど剥離による影響は無かったと考えられる。

以上の実験結果から、工具表面粗さの違いが平滑化に及ぼす影響についてまとめると、いずれの条件でも明らかに表面粗さが大きい Tool-1 よりも表面粗さが小さい Tool-2 の方が平滑化される。しかし、Tool-1 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、Tool-2 では初期工具ほどの平滑度が得られない。DLC, O 材では高圧縮率で工具表面状態が Tool-2 よりも Tool-1 で悪化しにくいという利点があるが、Tool-2 で高圧縮率でなくとも Tool-1 よりも良い平滑度が得られることから、いずれの場合でも Tool-2 を用いた方がより平滑な面が得られる。

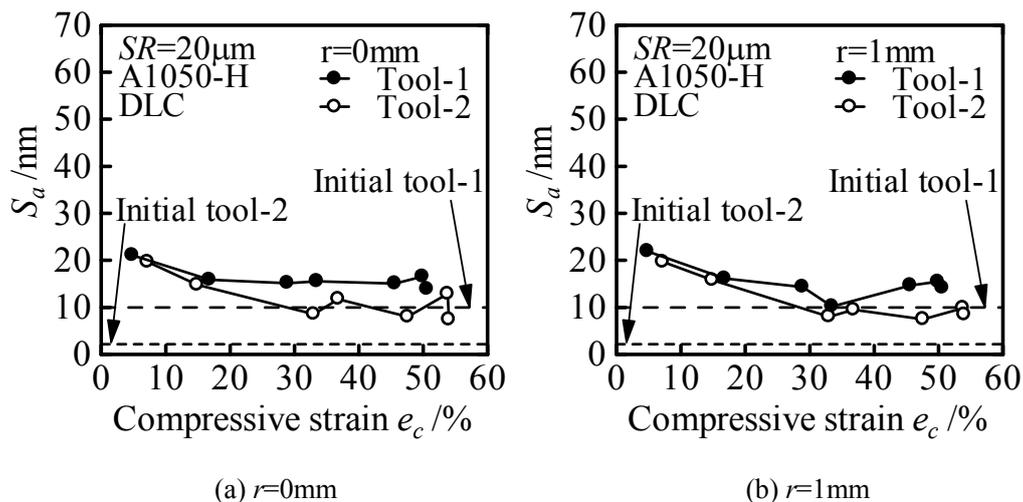
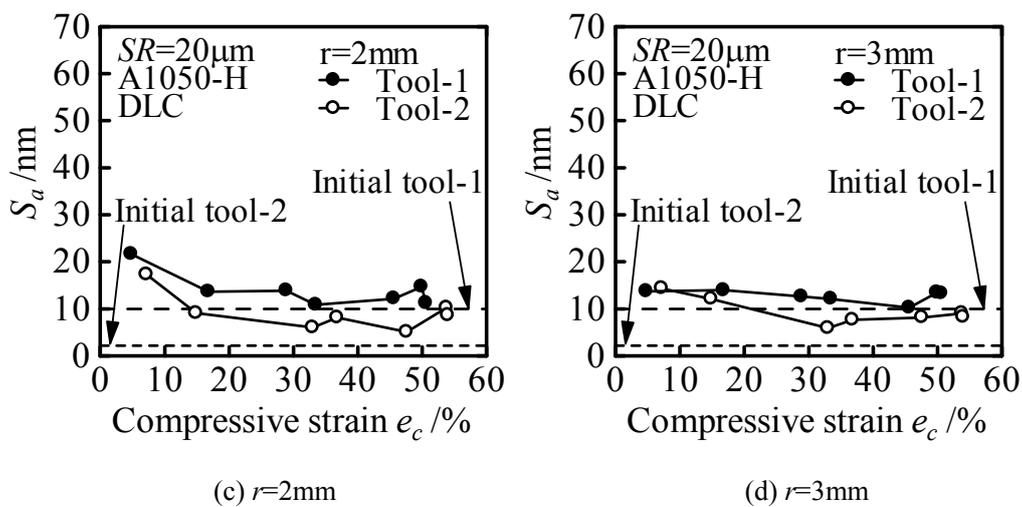
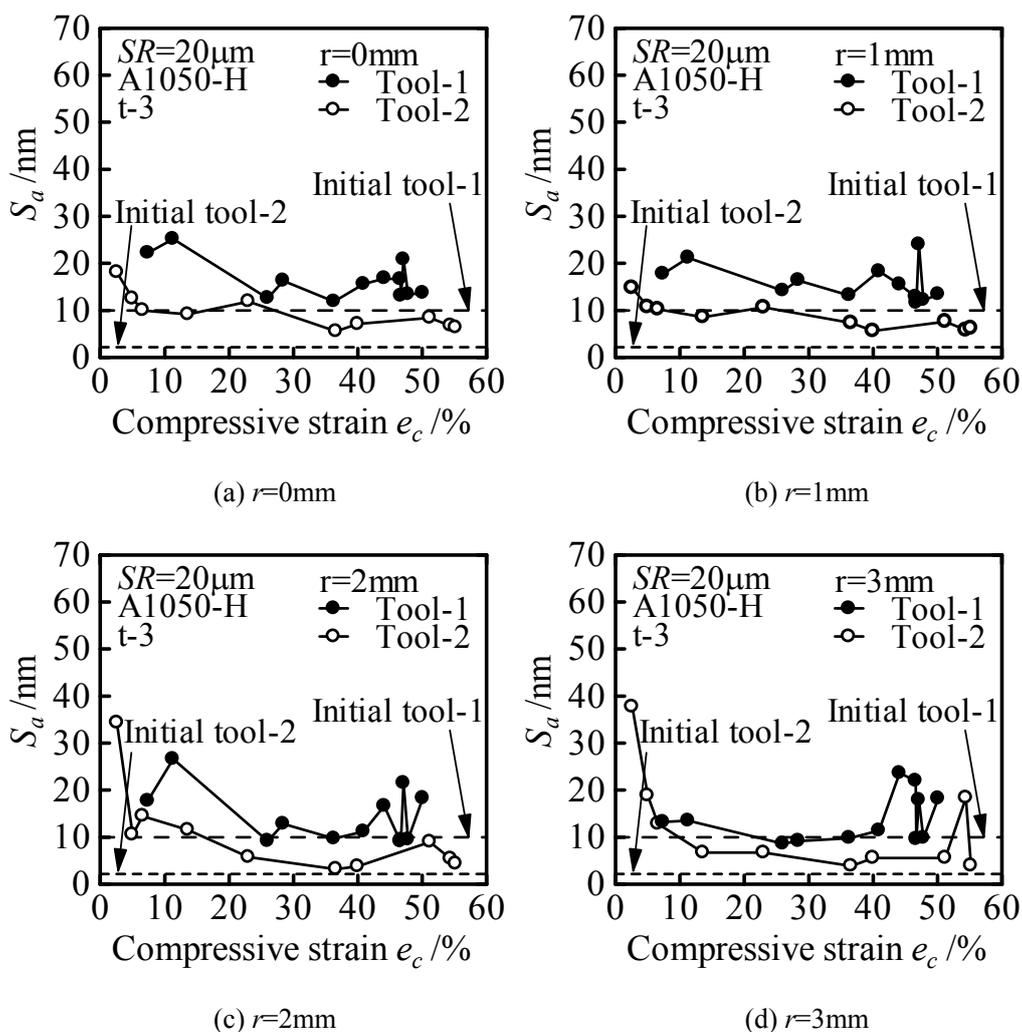
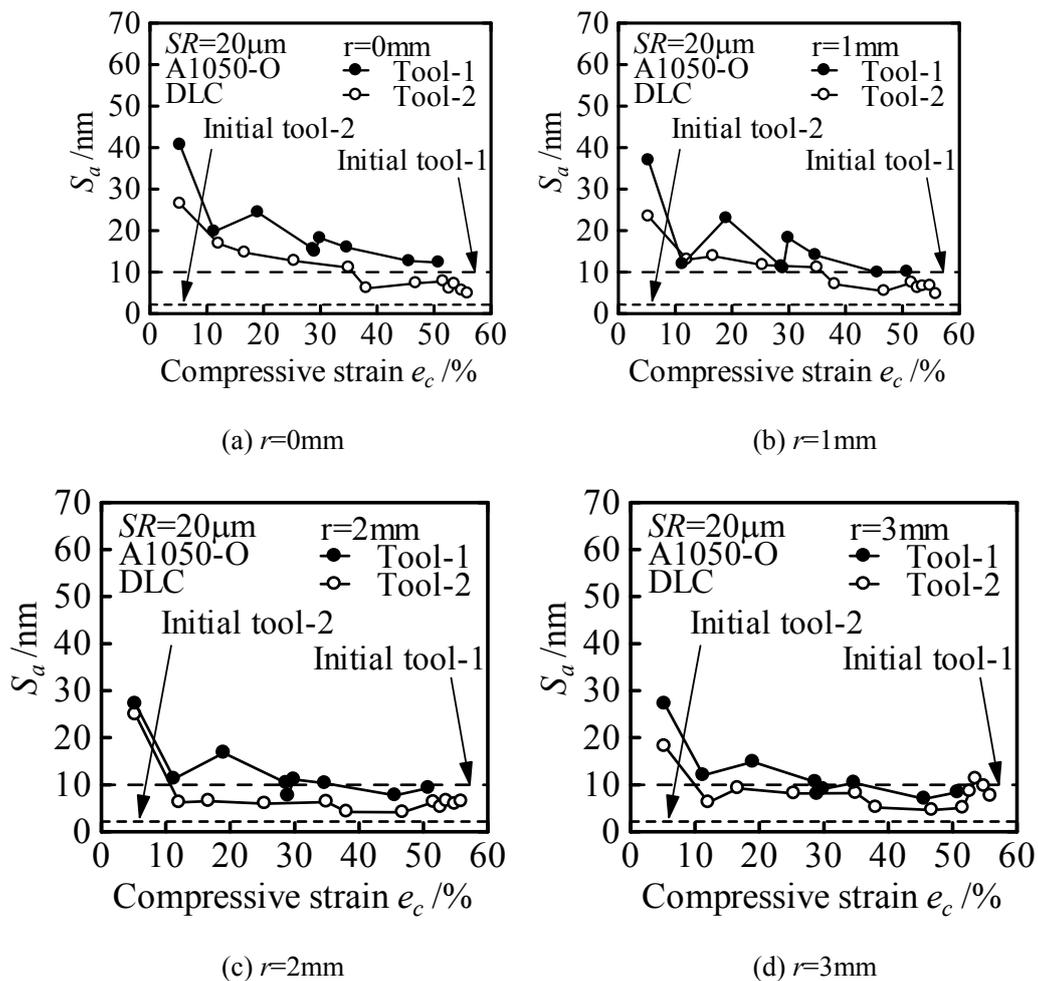
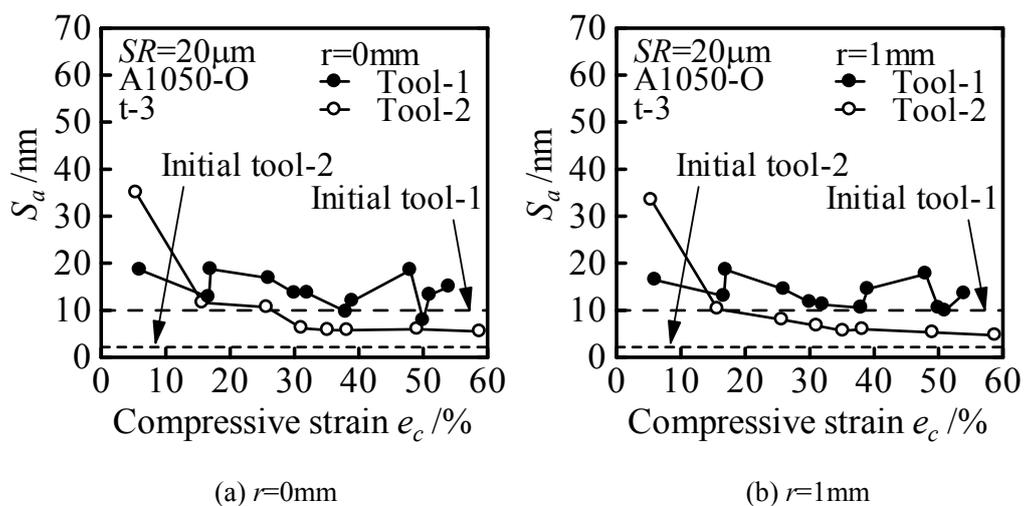


Fig.3.66 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, A1050-H)

Fig.3.66 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, A1050-H)Fig.3.67 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (t-3, A1050-H)

Fig.3.68 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, A1050-O)Fig.3.69 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (t-3, A1050-O)

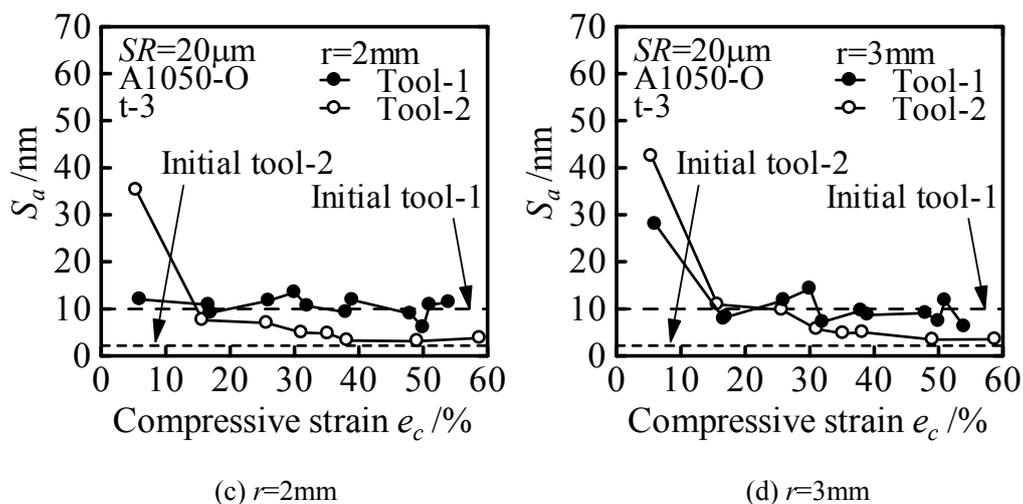


Fig.3.69 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (t-3, A1050-O)

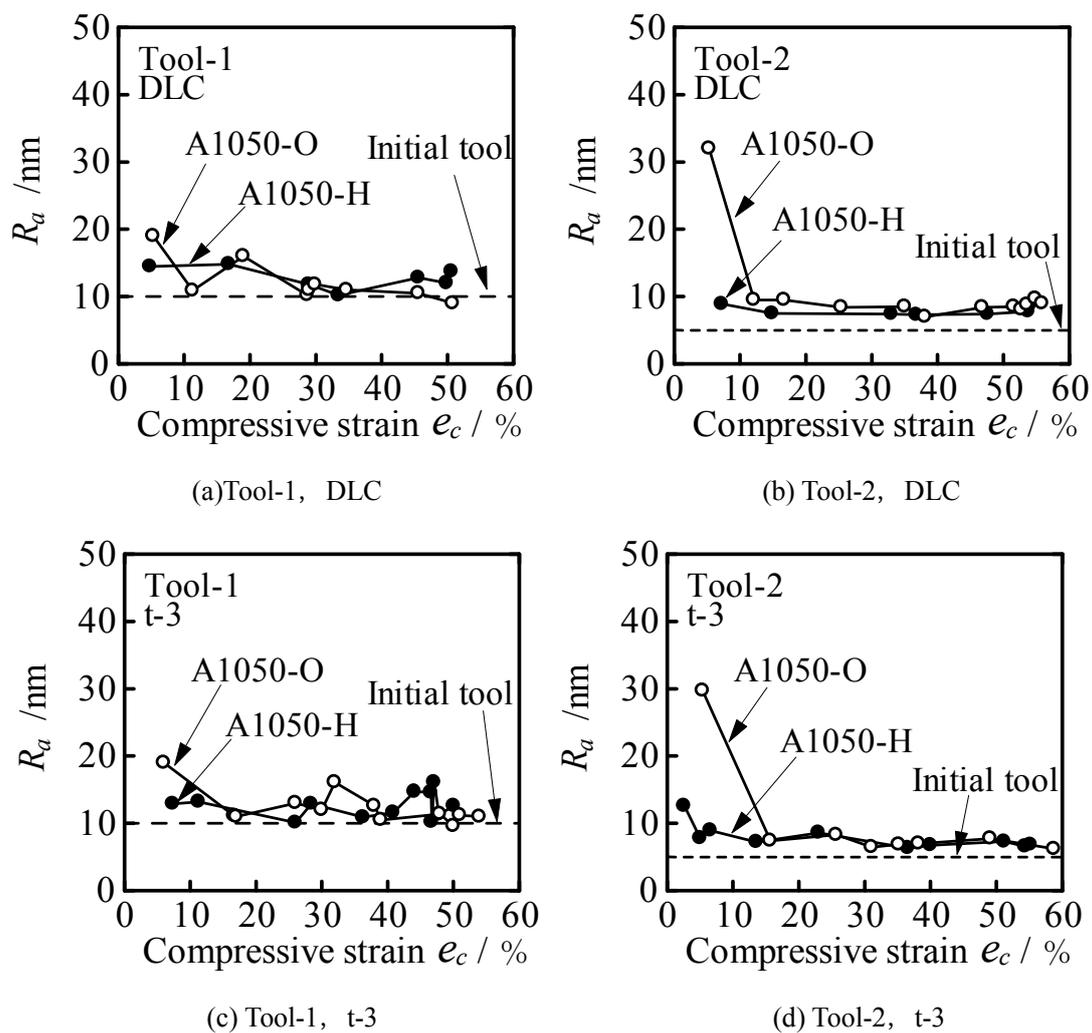
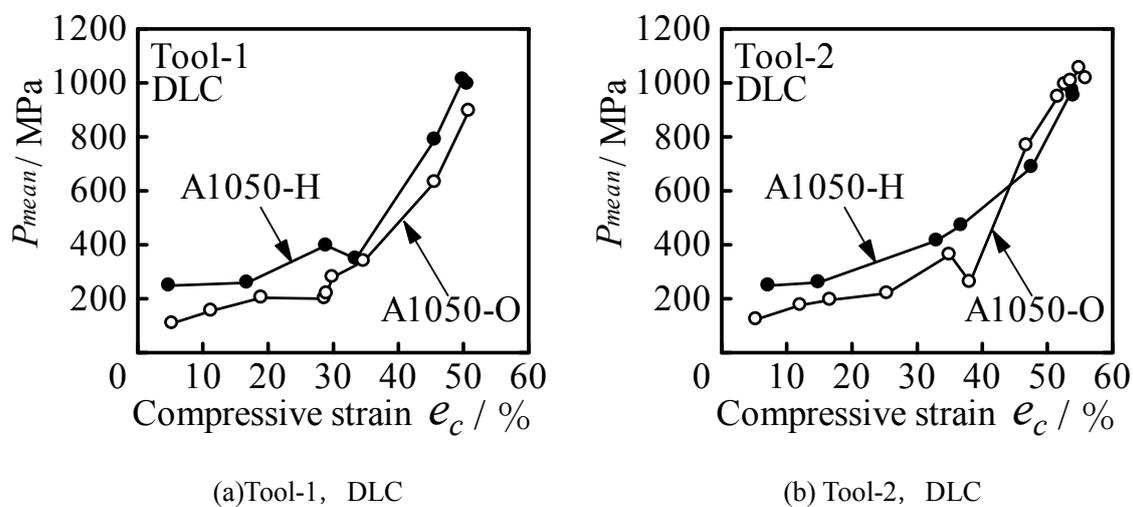
3.6 加工硬化による影響

3.6.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.70 に各条件で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。いずれの場合も低圧縮率において、O 材より H 材の R_a の方が小さく、特に Tool-2 ではその違いが大きい。これは、H 材の方が加工初期の変形抵抗が大きく、面圧が大きくなるため、転写効果が大きくなり、 R_a が小さくなったと考えられる。さらに Tool-2 はその傾向が大きいいため Tool-1 よりも転写効果の影響が大きいと考えられる。また、Tool-1、DLC において高圧縮率では H 材の方が R_a が大きい傾向が見られるが、H 材の外周部で工具表面状態が悪くなる様子が観察されたためと考えられる。

Fig.3.71 に各条件での平均面圧 p_{meant} と圧縮率 e_c の関係を示す。どの条件においても H 材の方が平均面圧が大きい傾向が見られる。これは、加工硬化している H 材の方が初期の変形抵抗が大きいためと考えられる。また Tool-2、DLC の高圧縮率では同程度の p_{meant} となっており、他の 3 条件では H 材の方が大きい傾向が見られる。これは Fig.3.72 に示すように Tool-2、DLC では同程度、他の 3 条件では O 材より H 材の方が工具表面状態が悪化する様子が見られたためと考えられる。

Fig.3.73 に各条件での荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係を示す。いずれも加工初期では O 材の方が荷重が低いことがわかる。これは加工硬化している H 材の方が初期の変形抵抗が大きいためと考えられる。

Fig.3.70 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係Fig.3.71 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係

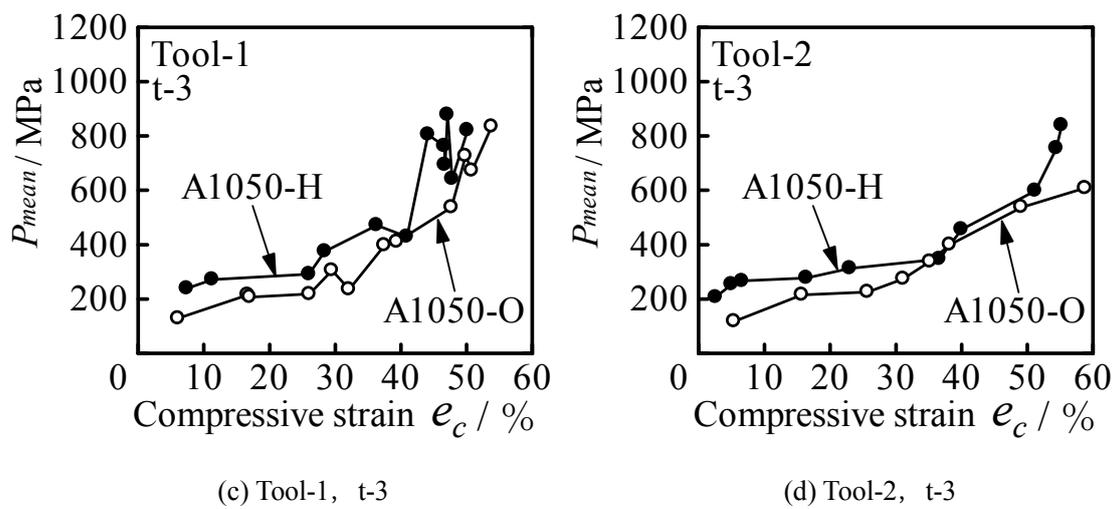
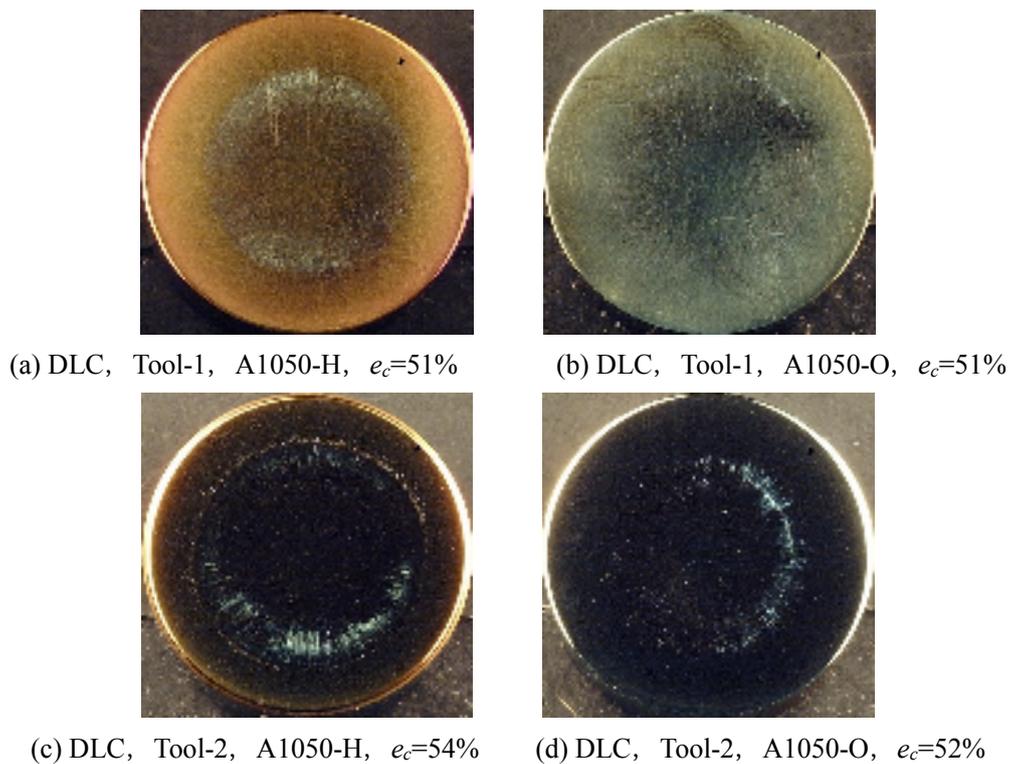
Fig.3.71 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係

Fig.3.72 圧縮後工具表面

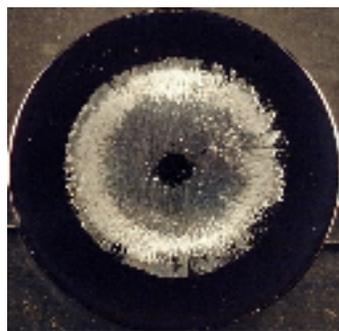
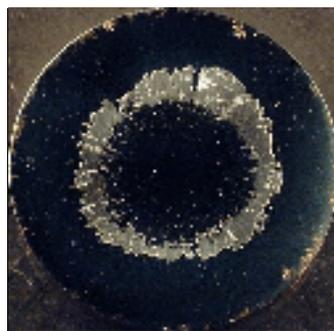
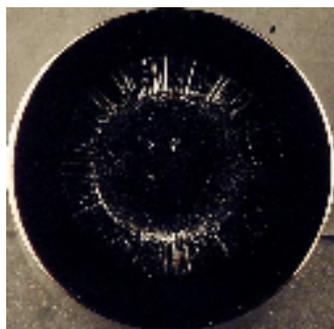
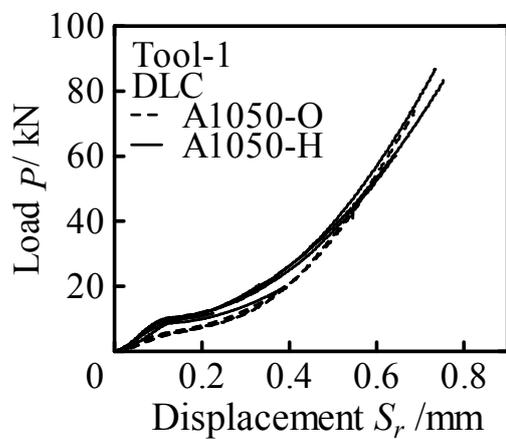
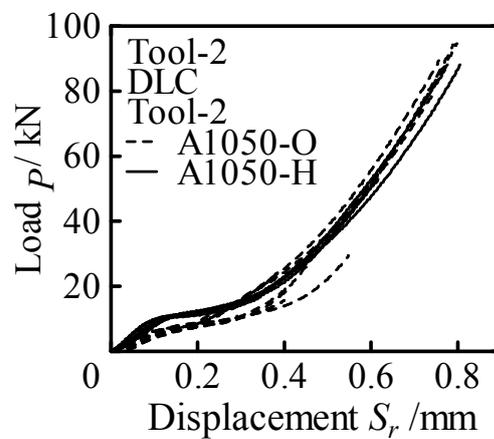
(e) t-3, Tool-1, A1050-H, $e_c=50\%$ (f) t-3, Tool-1, A1050-O, $e_c=50\%$ (g) t-3, Tool-2, A1050-H, $e_c=51\%$ (h) t-3, Tool-2, A1050-O, $e_c=49\%$

Fig.3.72 圧縮後工具表面

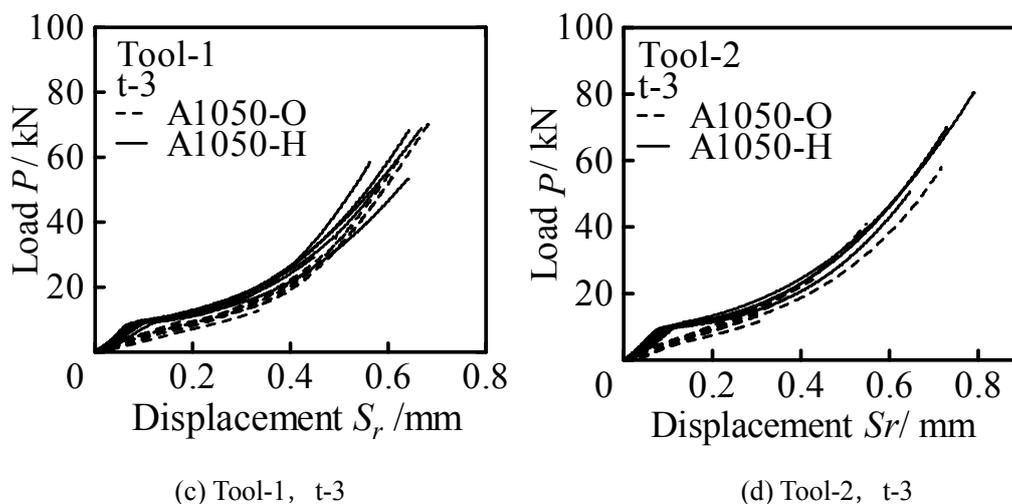


(a) Tool-1, DLC



(b) Tool-2, DLC

Fig.3.73 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係

Fig.3.73 荷重 P とレコーダ出力変位 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.3.74 に DLC, Tool-1 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. いずれの箇所も低圧縮率では O 材より H 材の方が S_a が小さい傾向が見られる. これは H 材は加工硬化により初期の変形抵抗が大きいため面圧による転写効果が大きく初期工具に近い S_a が得られたと考えられる. 高圧縮率の外周部では H 材が圧縮率 46%から 50%で S_a が大きくなる様子が見られる. 加工後の工具表面を観察した所, Fig.3.75 に示すように高圧縮率で H 材には O 材では見られなかった剥離のような痕が見られた. その影響で高圧縮率の H 材で僅かに S_a が大きくなったと考えられる. また, どちらも外周部ほど平滑化されており材料流動による平滑効果が大きいことがわかる.

Fig.3.76 に DLC, Tool-2 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. 低圧縮率では O 材より H 材の方が僅かに S_a が小さい傾向が見られるが Tool-1 ほどの差は見られない. 低圧縮率では H 材の方が転写効果が大きい, Tool-1 ほどの面圧による転写効果が働いていないと考えられる. Fig.3.77 に示すように高圧縮率ではどちらも剥離のような痕が見られたため, その影響で高圧縮率で僅かに S_a が大きくなると考えられる.

Fig.3.78 に t-3, Tool-1 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. 低圧縮率では O 材と H 材で大きな違いは見られない. また, どちらも他の条件に比べ高圧縮率で S_a が大きい場合が多い. これは高圧縮率では Fig.3.79 に示すようにカーボン蒸着膜が大きく剥離してしまい, 工具と金属接触してしまうためと考えられる.

Fig.3.80 に t-3, Tool-2 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. 低圧縮率では O 材より H 材の方が S_a が小さい傾向が見られ, これは H 材は加工硬化により初期の変形抵抗が大きいため面圧による転写効果が大きいため

と考えられる。しかし、Tool-1 に比べると同程度の平滑度しか得られず、十分に転写効果が得られていないと考えられる。高圧縮率の外周部では H 材が僅かに S_a が大きい場合もあるが、Fig.3.81 に示すように高圧縮率で H 材は O 材に比べ剥離が僅かに大きいためと考えられる。また、Tool-1 に比べると剥離は小さく、剥離による影響がほとんどないと思われる箇所も見られる。

以上の実験結果から、加工硬化が平滑化に及ぼす影響についてまとめると、低圧縮率において、H 材の方が加工初期の変形抵抗が大きく、面圧が大きくなるため、転写効果が大きくなり、O 材より H 材の方が平滑化が進む。また、O 材は H 材に比べ高圧縮率で平滑化が進む傾向がある。これは H 材は O 材に比べ高圧縮率で剥離など工具表面状態の悪化が生じやすいため、より平滑化を求めるのならば O 材を用いた方が良いと考えられる。

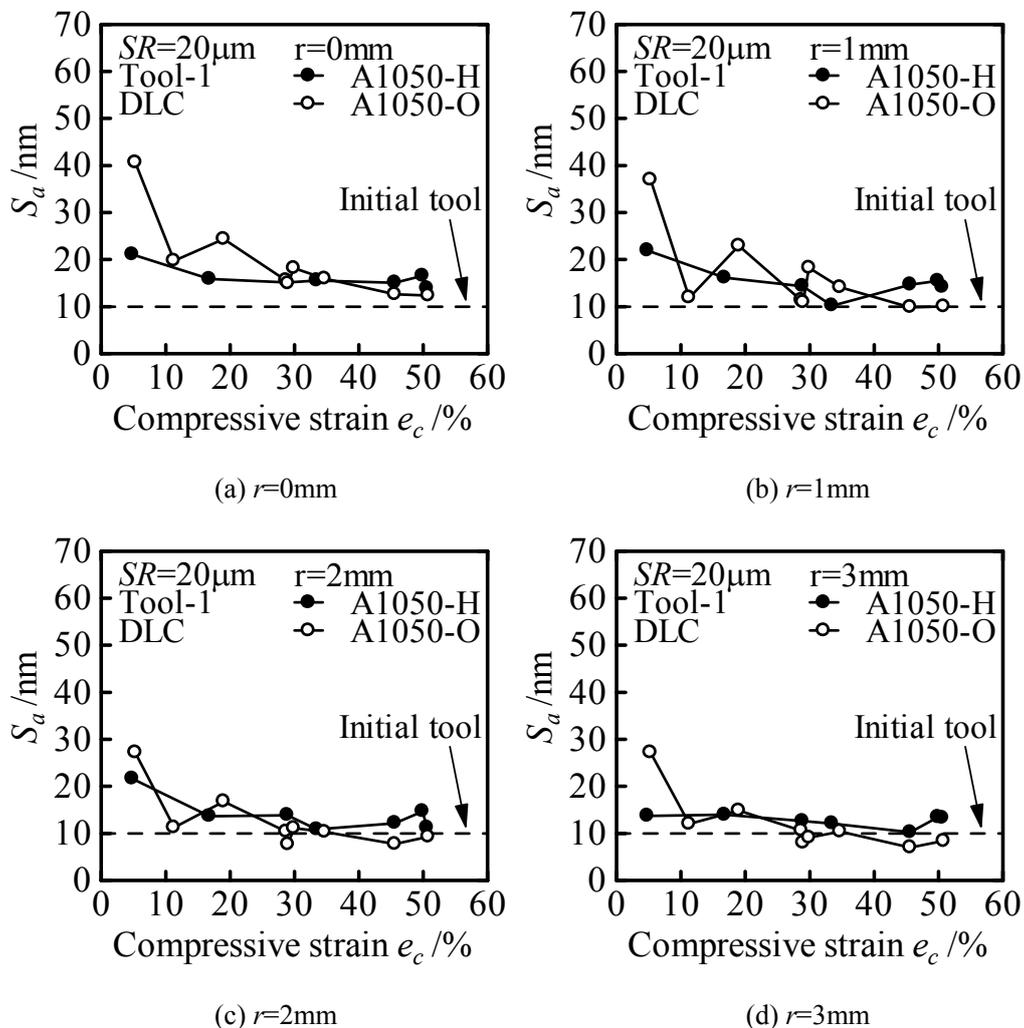


Fig.3.74 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1)

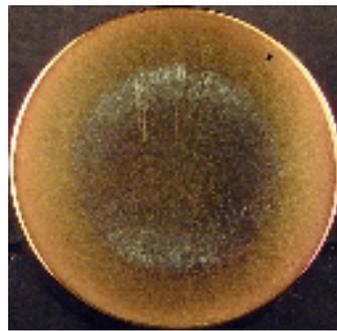
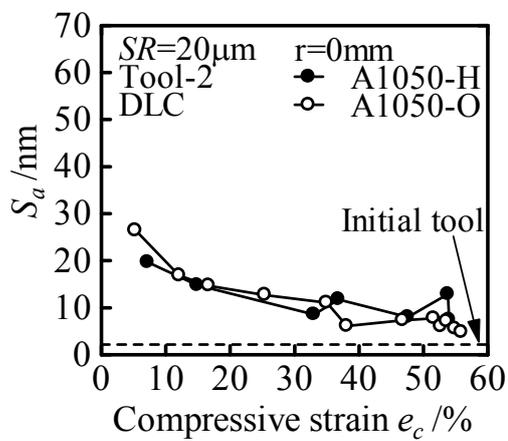
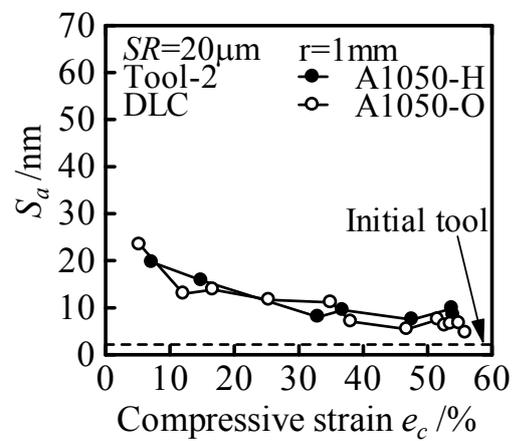
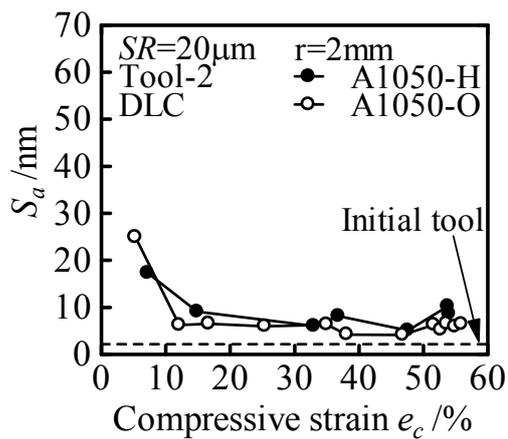
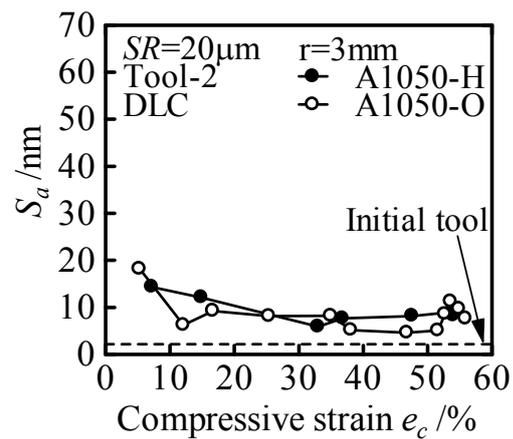
(a) A1050-H, $e_c=51\%$ (b) A1050-O, $e_c=51\%$

Fig.3.75 圧縮後工具表面 (DLC, Tool-1)

(a) $r=0\text{mm}$ (b) $r=1\text{mm}$ Fig.3.76 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2)(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 (DLC, Tool-2)

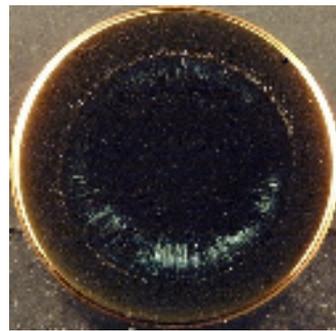
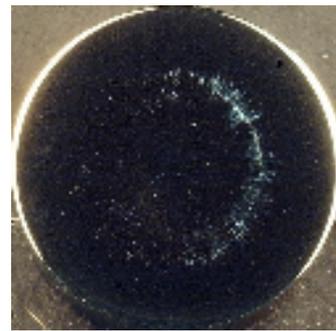
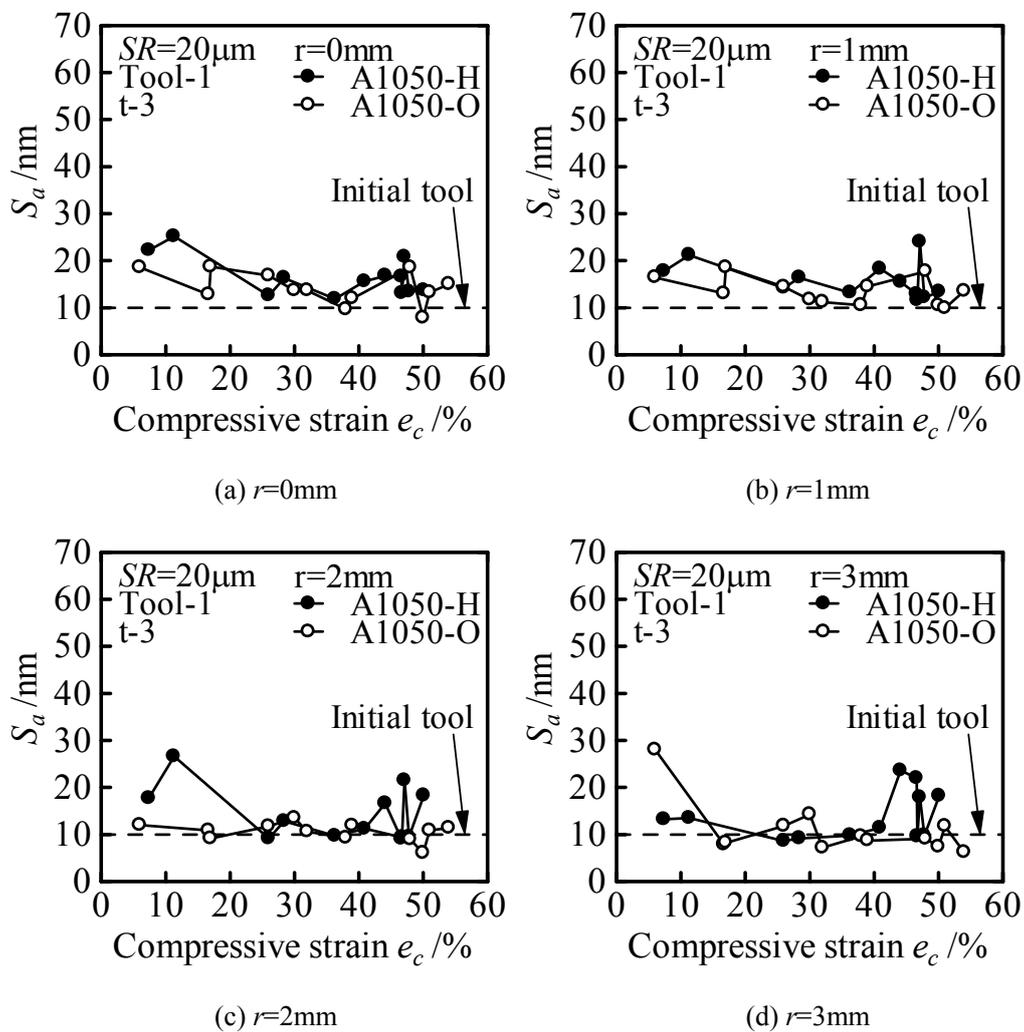
(a) A1050-H, $e_c=54\%$ (b) A1050-O, $e_c=52\%$

Fig.3.77 圧縮後工具表面 (DLC, Tool-2)

Fig.3.78 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (t-3, Tool-1)



(a) A1050-H, $e_c=50\%$ (b) A1050-O, $e_c=50\%$

Fig.3.79 圧縮後工具表面 (t-3, Tool-1)

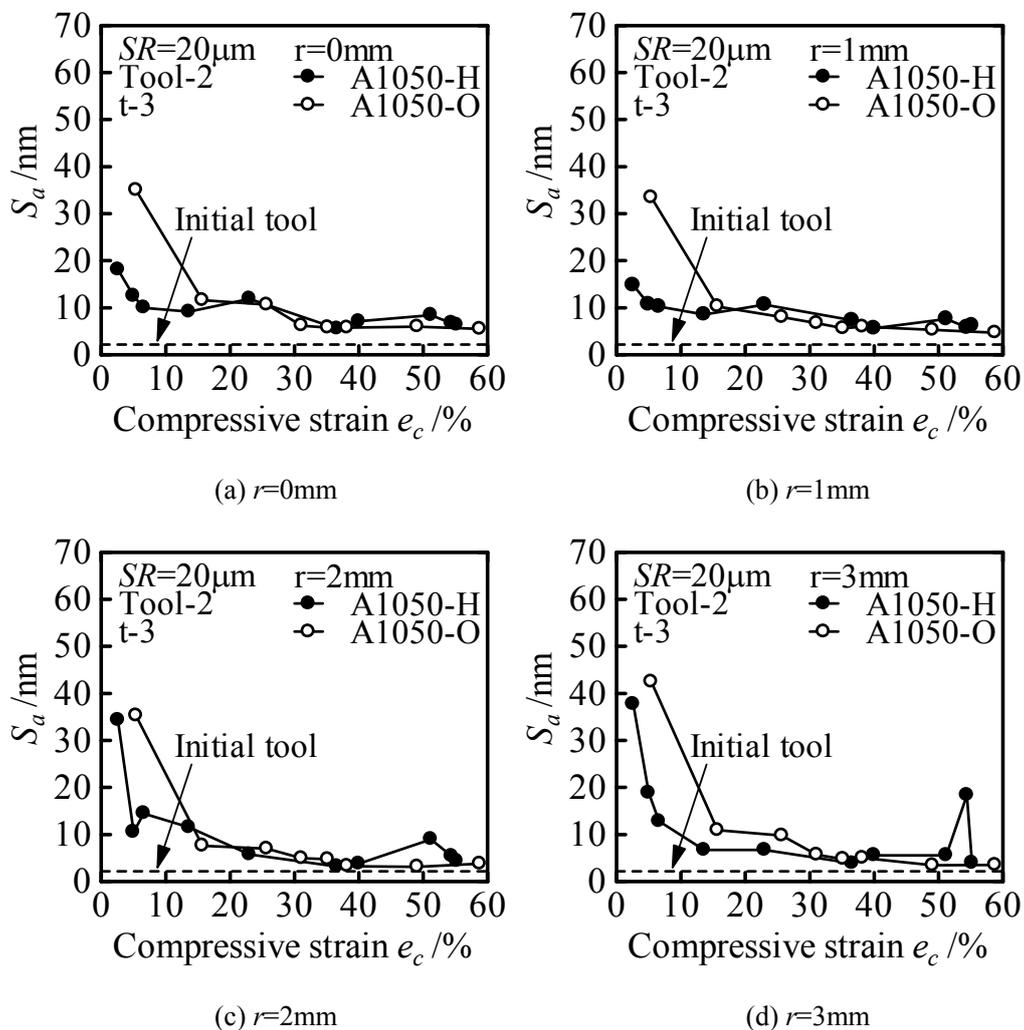


Fig.3.80 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (t-3, Tool-2)

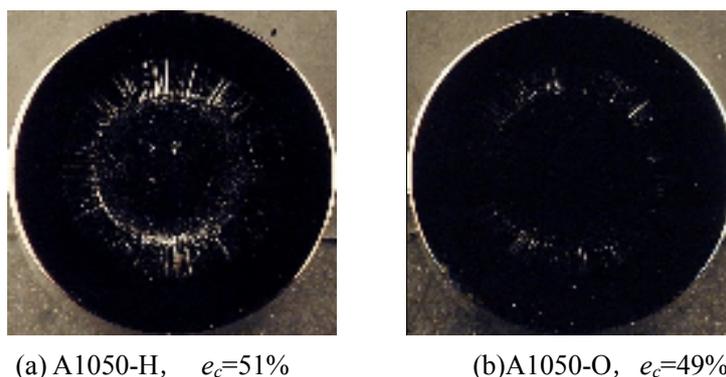
(a) A1050-H, $e_c=51\%$ (b) A1050-O, $e_c=49\%$

Fig.3.81 圧縮後工具表面 (t-3, Tool-2)

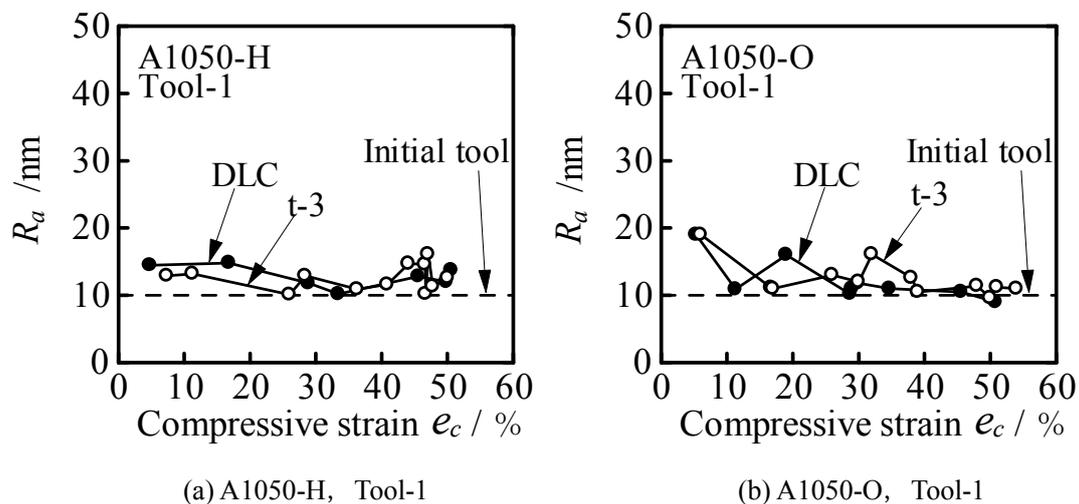
3.7 工具表面膜の違いによる影響

3.7.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.82 に各条件で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. DLC と t-3 で R_a に大きな違いは見られない.

Fig.3.83 に各条件での平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す. 高圧縮率において DLC は t-3 に比べて平均面圧 p_{mean} が大きい傾向がある. このことから高圧縮率では DLC よりも t-3 の方が潤滑状態が良いことがわかる.

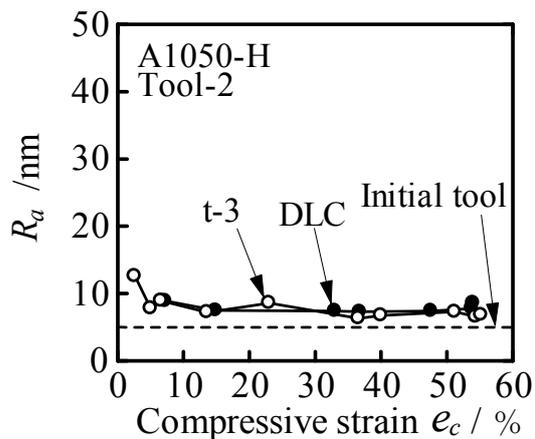
Fig.3.84 に各条件での荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係を示す. p_{mean} と同様に高圧縮率において DLC は t-3 に比べて僅かに大きい傾向がある.



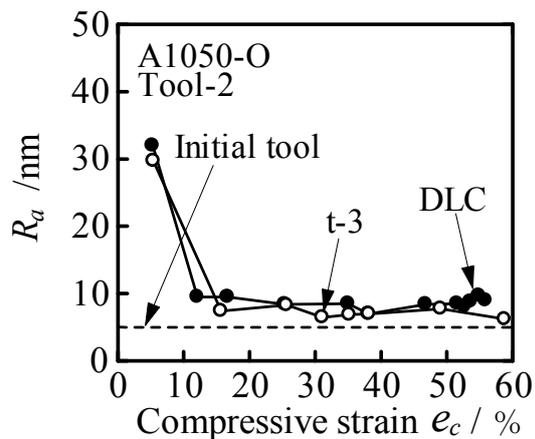
(a) A1050-H, Tool-1

(b) A1050-O, Tool-1

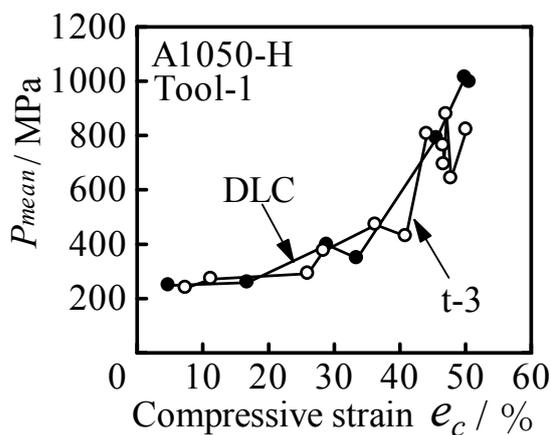
Fig.3.82 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係



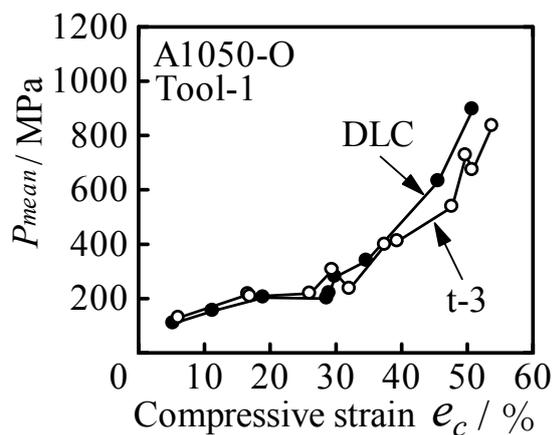
(c) A1050-H, Tool-2



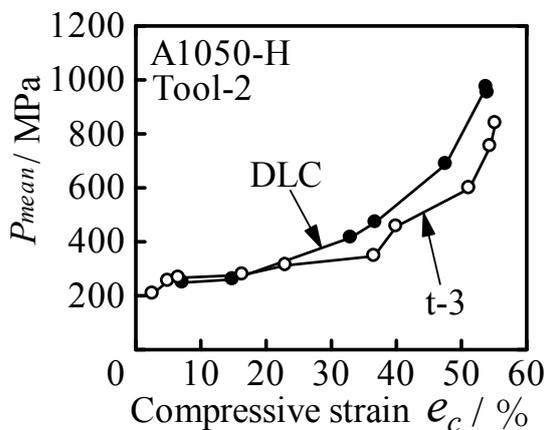
(d) A1050-O, Tool-2

Fig.3.82 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係

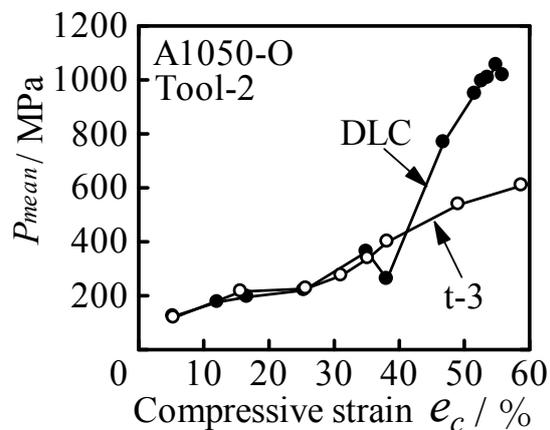
(a) A1050-H, Tool-1



(b) A1050-O, Tool-1

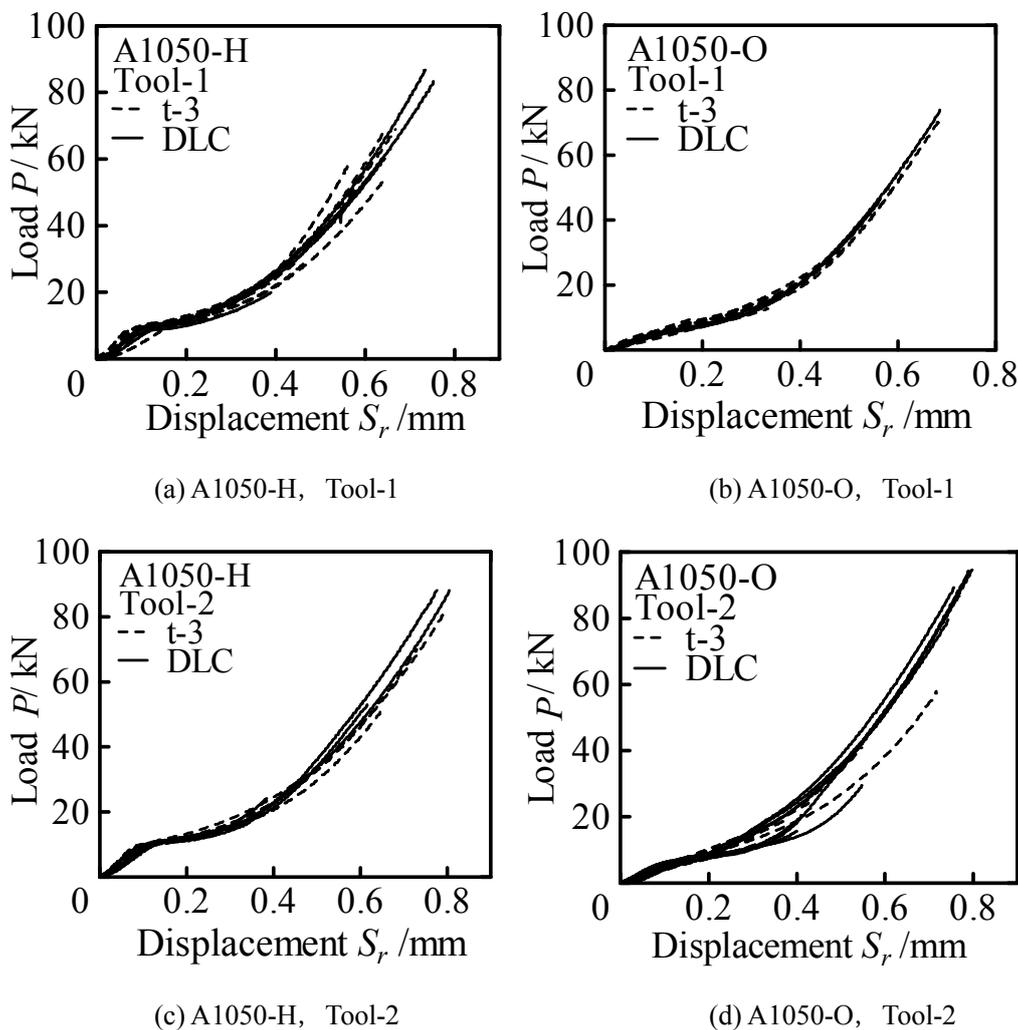


(c) A1050-H, Tool-2



(d) A1050-O, Tool-2

Fig.3.83 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係

Fig.3.84 荷重 P とレコーダ出力変位 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.3.85 に Tool-1, A1050-H の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 低圧縮率では大きな違いは見られないが, 高圧縮率では外周部で t-3 の S_a が大きい傾向が見られる. これは高圧縮率でカーボン蒸着膜が剥離した影響と考えられる.

Fig.3.86 に Tool-2, 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. 圧縮率が大きいほど平滑化される傾向が見られる. H 材, Tool-2 では DLC と t-3 で大きな違いは見られなかった.

Fig.3.87 に Tool-1, A1050-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. 圧縮率が大きいほど平滑化され, Tool-2 は初期工具ほどの平滑度が得られないのに対し, Tool-1 は外周部では初期工具と同等の平滑度が得られてい

ることがわかる。DLC と t-3 の大きな違いは見られなかった。

Fig.3.88 に Tool-2, A1050-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。圧縮率が大きくなるにつれ S_a は小さくなる傾向がある。外周部での S_a は低圧縮率では比較的 DLC の方が小さく、高圧縮率になると DLC の方が大きくなる。DLC の外周部では低圧縮率では潤滑状態がよく、圧縮率が高くなると潤滑状態が悪くなるためと考えられる。Fig.3.89 に示すように、実験後工具は高圧縮率においてどちらも僅かに剥離などが観察された。DLC はその影響でわずかに S_a が大きくなったが、t-3 は剥離による影響が少なかったため S_a が大きくなることが無かったと考えられる。

実験結果から、工具表面膜の違いが平滑化に及ぼす影響についてまとめる。剥離等の発生しない中心部や圧縮率 50% 以下では大きな違いは見られなかった。t-3 の高圧縮率の外周部では、Tool-1 は O 材、H 材どちらも大きく剥離し、Tool-2 は僅かに剥離が発生した。さらに H 材において剥離による影響で平滑度が悪くなる場合があるが、O 材ではその影響が少なく、高圧縮率でも平滑化が進んだ。DLC の Tool-1 においては剥離などにより平滑度が悪くなることは無かったが、Tool-2 では高圧縮率の外周部で工具表面状態の悪化により平滑度が悪くなる傾向が見られた。以上より、t-3 は Tool-1 よりも Tool-2 に蒸着した方が剥離しにくく、DLC は Tool-2 よりも Tool-1 にコーティングした方が工具表面状態の悪化を抑えることができる。また、DLC は t-3 に僅かに劣る平滑度となったが、工具表面状態の影響が無い箇所では t-3 とほぼ同程度の平滑度が得られる。

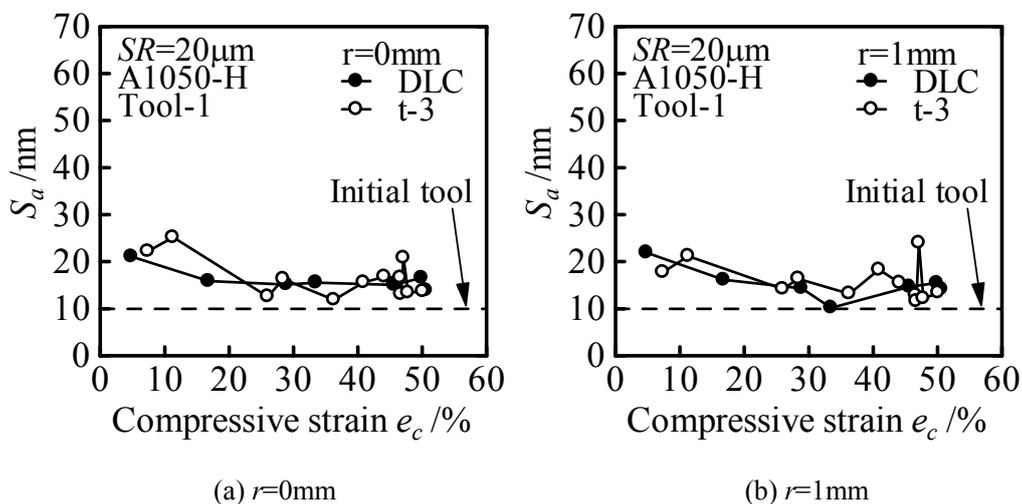
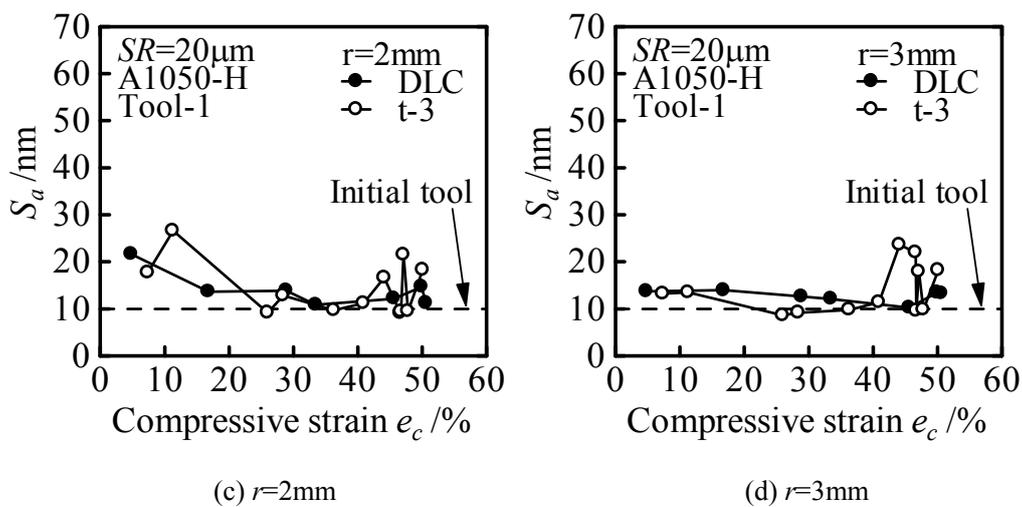
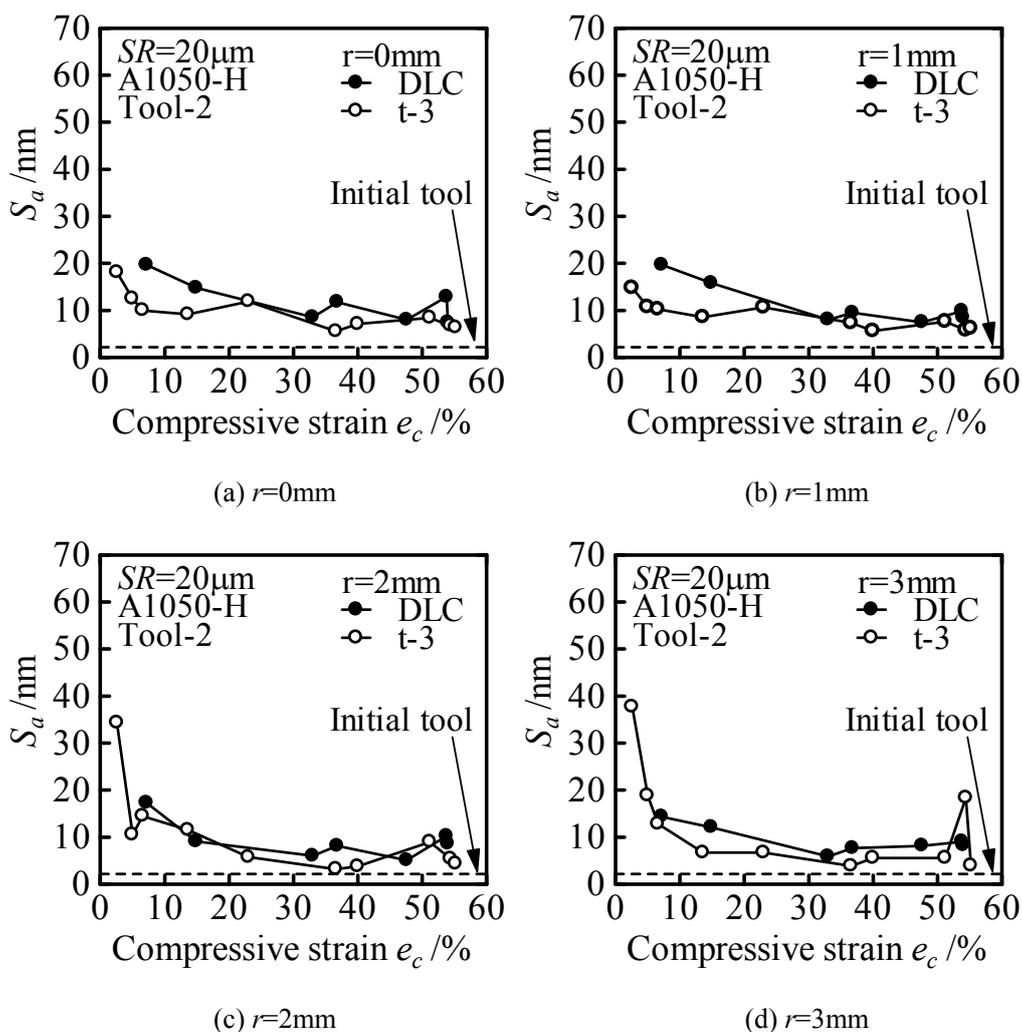
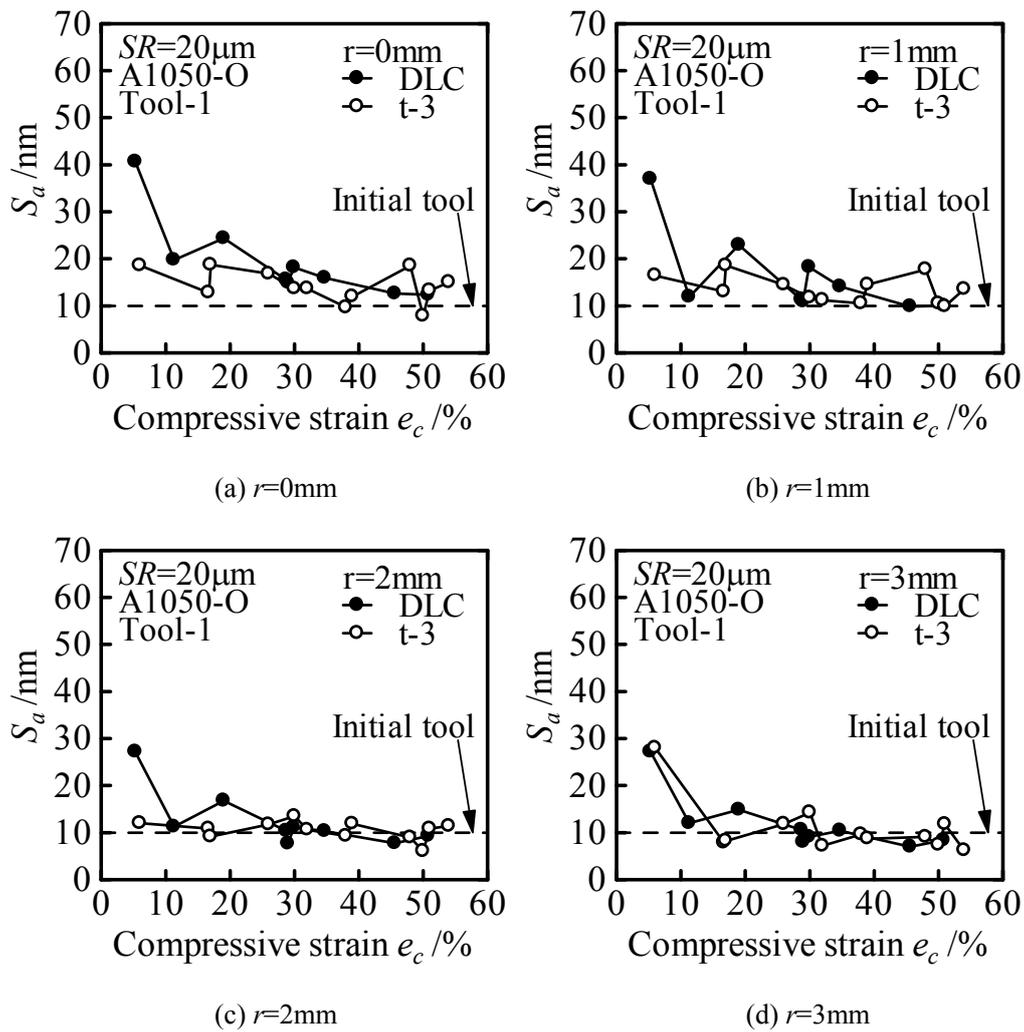
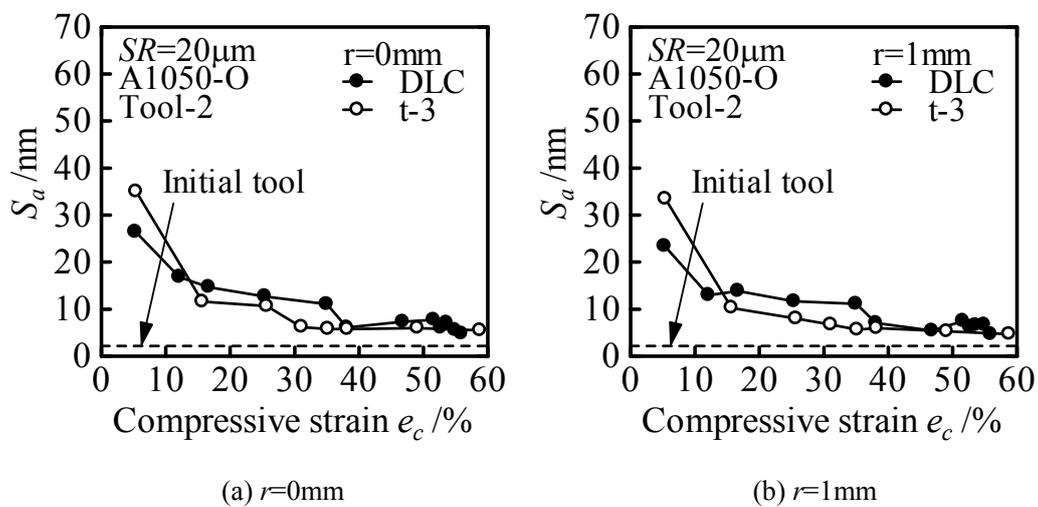


Fig.3.85 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H)

Fig.3.85 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H)Fig.3.86 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, A1050-H)

Fig.3.87 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-O)Fig.3.88 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, A1050-O)

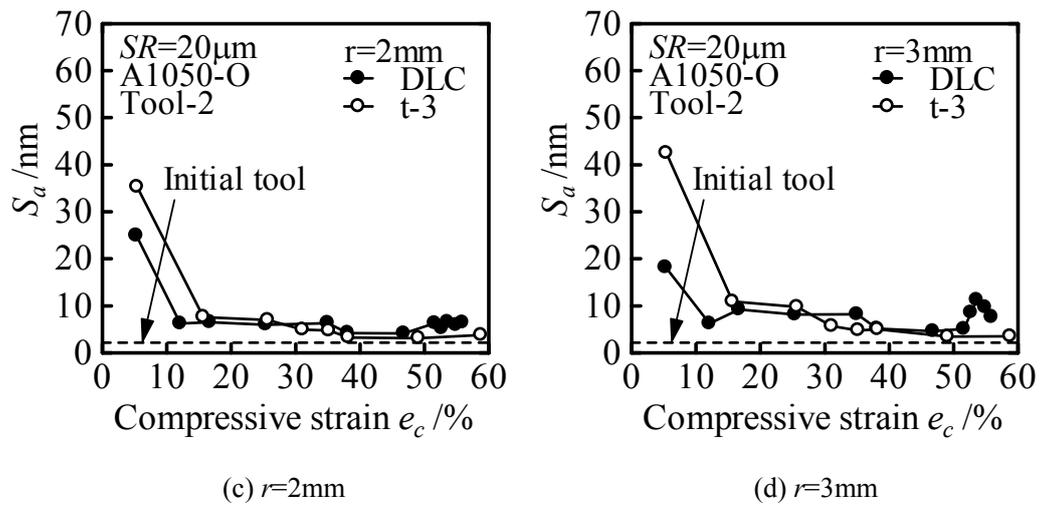


Fig.3.88 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, A1050-O)

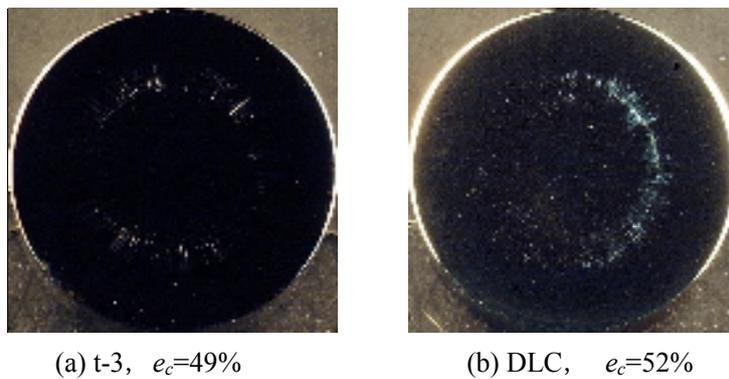


Fig.3.89 圧縮後工具表面 (Tool-2, A1050-O)

3.8 各条件が平滑化に及ぼす影響

これまでの実験結果から、各条件が平滑化に及ぼす影響についてまとめる。

工具表面粗さの観点から、いずれの条件でも明らかに Tool-1 よりも Tool-2 の方が平滑化される。しかし、Tool-1 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、Tool-2 では初期工具ほどの平滑度が得られない。

加工硬化の観点から、いずれの条件でも低圧縮率において、H 材の方が加工初期の変形抵抗が大きく、面圧が大きくなるため、転写効果が大きくなり、O 材より H 材の方が平滑化が進む。また、O 材は H 材に比べ高圧縮率で平滑化が進む傾向がある。これは H 材は O 材に比べ高圧縮率で剥離など工具表面状態の悪化による影響が僅かに大きいためと考えられる。

工具表面膜の観点から、剥離等の発生しない中心部や圧縮率 50%以下では大きな違いは見られなかった。t-3 の高圧縮率の外周部では、Tool-1 は O 材、H 材どちらも大きく剥離し、Tool-2 は僅かに剥離が発生した。さらに H 材において剥離による影響で平滑度が悪くなる場合があるが、O 材ではその影響が少なく高圧縮率でも平滑化が進んだ。DLC の Tool-1 においては剥離などにより平滑度が悪くなることは無かったが、Tool-2 では高圧縮率の外周部で工具表面状態の悪化により平滑度が悪くなる傾向が見られた。以上より、t-3 は Tool-1 よりも Tool-2 に蒸着した方が剥離しにくく、DLC は Tool-2 よりも Tool-1 にコーティングした方が工具表面状態の悪化を抑えることができる。また、DLC は t-3 に僅かに劣る平滑度となったが、工具表面状態の影響が無い箇所では t-3 とほぼ同程度の平滑度が得られる。

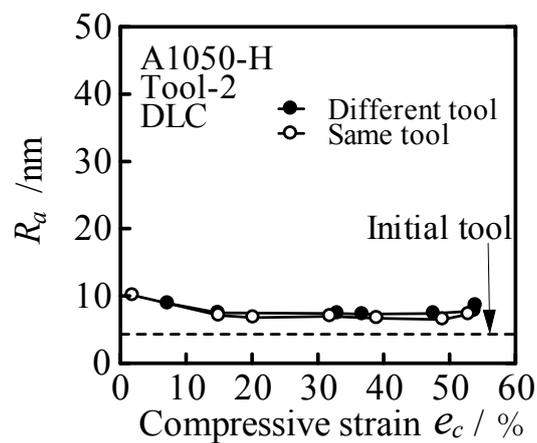
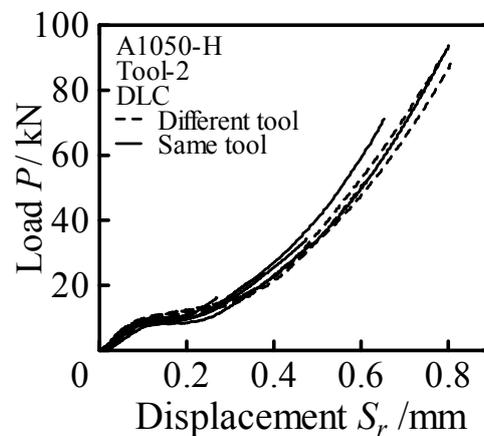
Table 3.3 にこれまでに行った条件とその条件での最小の算術平均面粗さ S_a を示す。どの条件でも圧縮率は 30~50%、測定箇所は比較的外周部で最も平滑化されていることがわかる。また本研究の範囲では、t-3、Tool-2、A1050-O の圧縮率 49%、 $r=2\text{mm}$ で最も平滑な面を得ることができた。Tool-1 よりも Tool-2 を用いた方がより平滑化が進み、さらに H 材よりも O 材を用いた方が剥離等が発生しにくいため、O 材を用いた方が良いと考えられる。

また、これまで本研究では 1 度の試験で 1 つの工具を使用してきたが、DLC はカーボンに比べ高硬度、磨耗しにくいなどの特徴があるため 1 つの工具で複数回試験を行えるのではないかと考えた。以下に 3.3 での結果と同条件で 1 つの工具で複数回圧縮した結果の比較を示す。

Fig.3.90 に算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を、Fig.3.91 に荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係を、Fig.3.92 に測定箇所 $r=0\text{mm}$ 、 $r=1\text{mm}$ 、 $r=2\text{mm}$ 、 $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。これらより、同一の工具を用いてもこれまで同様の結果が得られていることがわかる。本研究で DLC に関しては、t-3 にわずかに劣る平滑度となったが、1 度の試験で少なからず剥離が発生するカーボンに対して DLC は剥離など工具表面状態の変化はほとんど見られなかったため、複数回圧縮を行う場合は DLC を用いると良いと考えられる。

Table 3.3 これまでに行った圧縮試験条件と最小の算術平均面粗さ S_a

Material of specimen	Coating material of tool	Roughness of tool R_a / nm	Minimum roughness of specimen S_a / nm
A1050-O	Carbon(t-3)	10(Tool-1)	6.1($e_c=50\%$, $r=2\text{mm}$)
		5(Tool-2)	3.1($e_c=49\%$, $r=2\text{mm}$)
	DLC	10(Tool-1)	7.0($e_c=46\%$, $r=3\text{mm}$)
		5(Tool-2)	4.1($e_c=47\%$, $r=2\text{mm}$)
A1050-H	Carbon(t-3)	10(Tool-1)	8.6($e_c=26\%$, $r=3\text{mm}$)
		5(Tool-2)	3.2($e_c=37\%$, $r=2\text{mm}$)
	DLC	10(Tool-1)	10.2($e_c=33\%$, $r=1\text{mm}$)
		5(Tool-2)	5.1($e_c=48\%$, $r=2\text{mm}$)

Fig.3.90 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)Fig.3.91 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

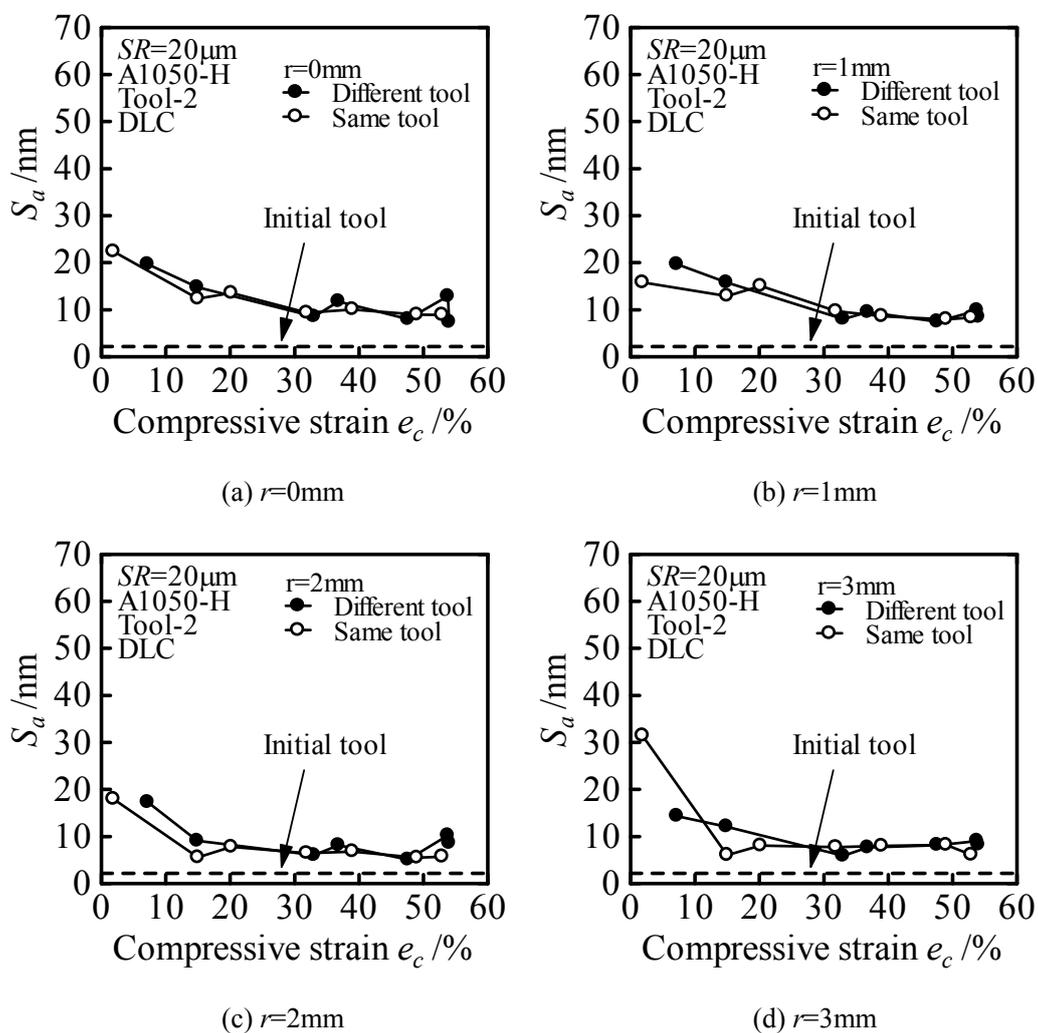


Fig.3.92 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

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⁽³²⁾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⁽³³⁾。

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⁽³⁴⁾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。

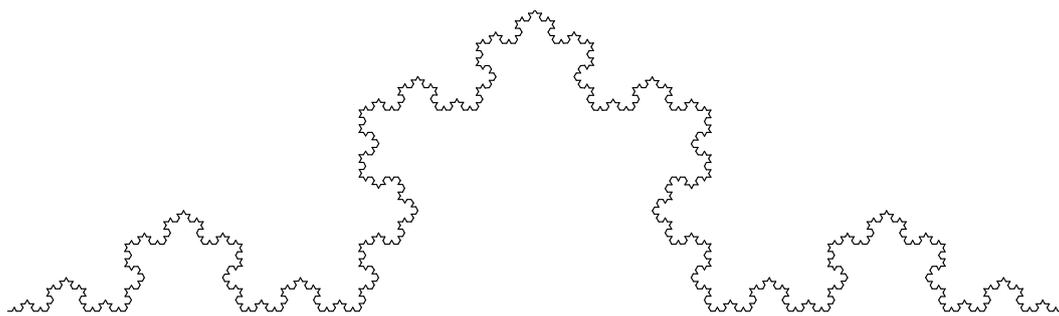


Fig. 4.1 コッホ曲線

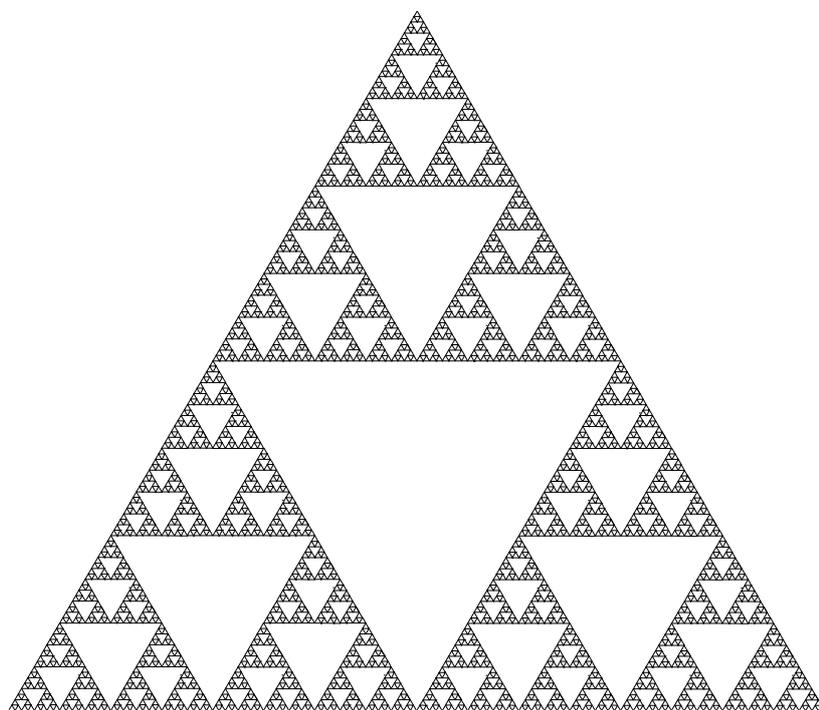


Fig. 4.2 シルピンスキーのギャスケット



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」⁽³⁵⁾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⁽³³⁾。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⁽²⁶⁾。

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

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

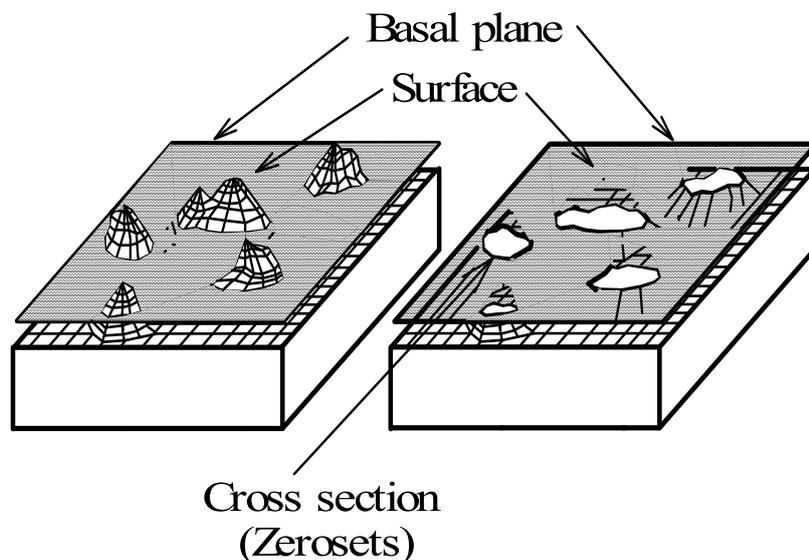


Fig. 4.4 零点集合法の概要

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⁽²⁹⁾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」⁽³⁴⁾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。

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

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。

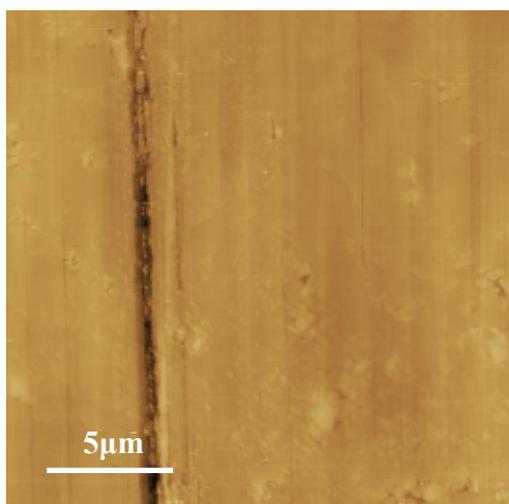
零点集合カット面をつくるには、色調が 256 階調で表されているグレー画像をしきい値で 2 値化しなくてはならない。この 2 値化のために AFM 画像の最大高さからのカット量を相対カット量として表すことにした。相対カット量 δ は次式で表される。

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

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 $\delta=49\%$ だけ、 $\delta=65\%$ だけの両対数グラフを示す。相対カット量による違いはほとんどないことがわかる。



(a) AFM 画像



(b) グレー画像

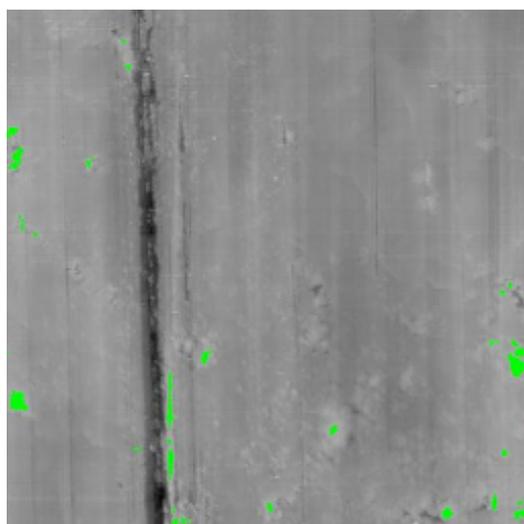
(c) 2 値化画像($\delta=34\%$)

Fig.4.5 零点集合法における画像処理の流れ
($e_c=40\%$, $SR=20\mu\text{m}$, t-3, Tool-2, A1050-H)

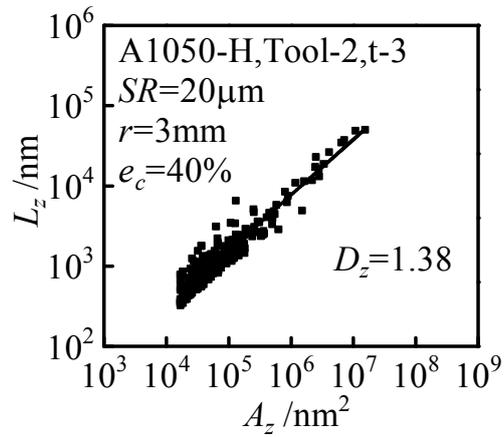
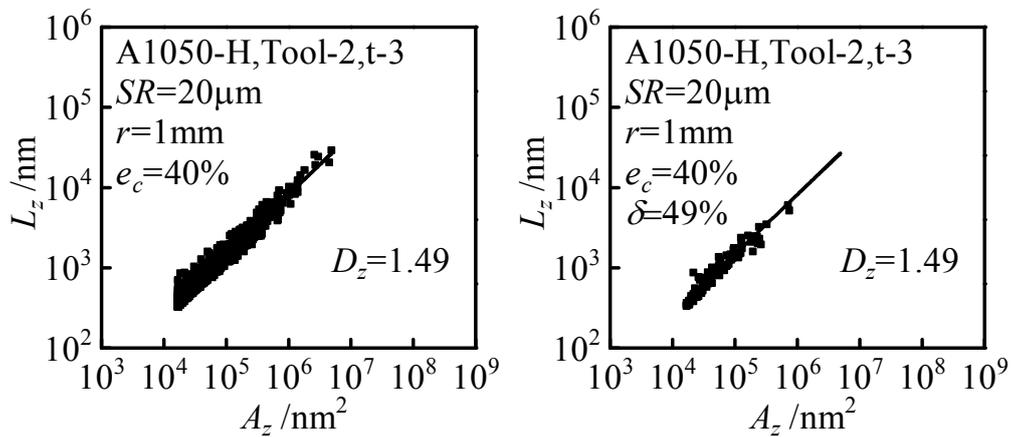
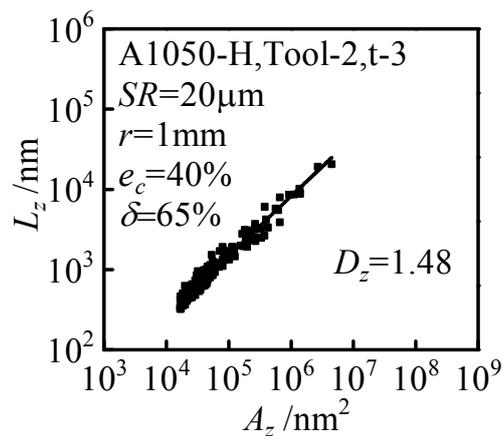
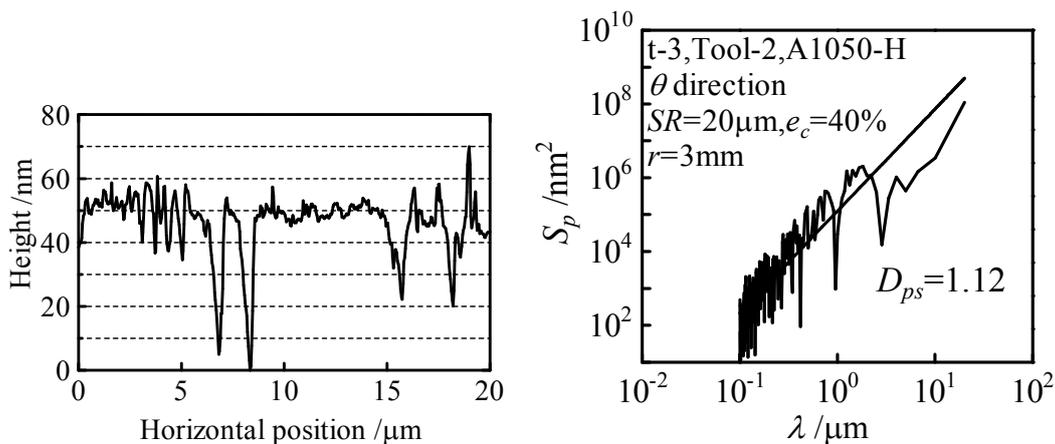
Fig.4.6 周囲長 L_z と面積 A_z の関係(a) $\delta=18\%, 34\%, 49\%, 65\%, 80\%$ (b) $\delta=49\%$ (c) $\delta=65\%$

Fig.4.7 相対カット量の違いによる比較 (t-3, Tool-2, A1050-H)



(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.4.8 パワースペクトル法における処理の流れ

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、Microsoft Visual Basic 6.0 を用いて戸田⁽¹⁷⁾が改良したプログラム「改良 1 次元 FFT.vbp」を脇⁽²²⁾が C 言語に書き換えた「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。

4.4 カーボン蒸着工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$), t-3 (膜厚 $t=40\text{nm}$), 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。なお、工具初期表面 (Tool-2) の零点集合次元 $D_Z=1.31$ 、試験片初期表面の $D_Z=1.31$ であった。

Fig.4.9 に t-3, A1050-H の零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。40%以上ではどの測定箇所においても初期工具、初期試験片の D_Z 以上の値になっているが、ばらつきが大きいので関係にあまり規則性は見られない。

Fig.4.10 に t-3 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。全体的に初期試験片、初期工具の平均の D_Z の値よりも大きくなっており、 S_a が小さくなると D_Z は若干大きくなる傾向がある。

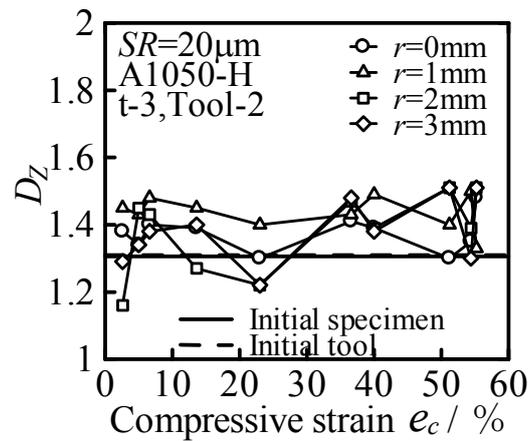


Fig.4.9 D_Z と圧縮率 e_c の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)

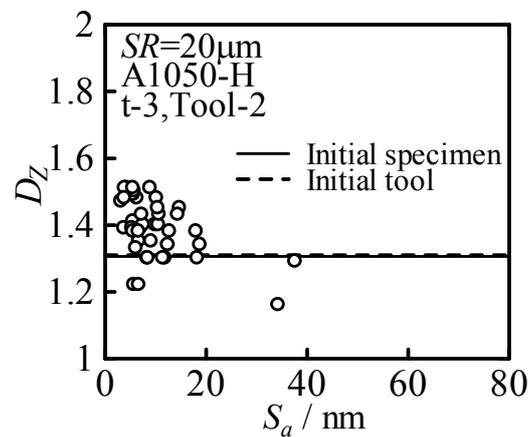


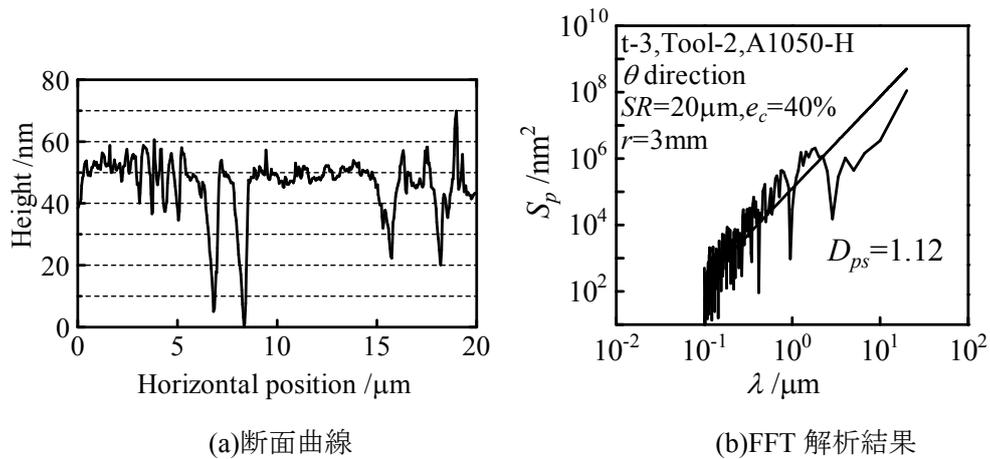
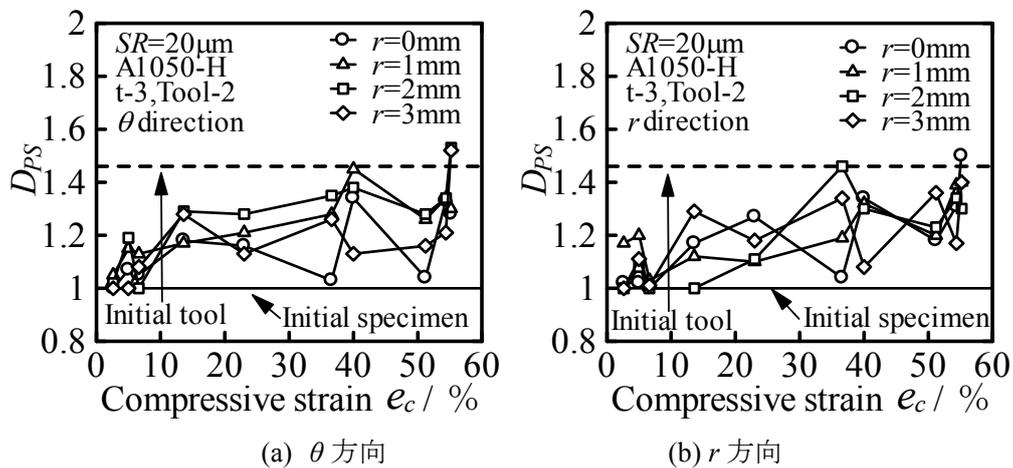
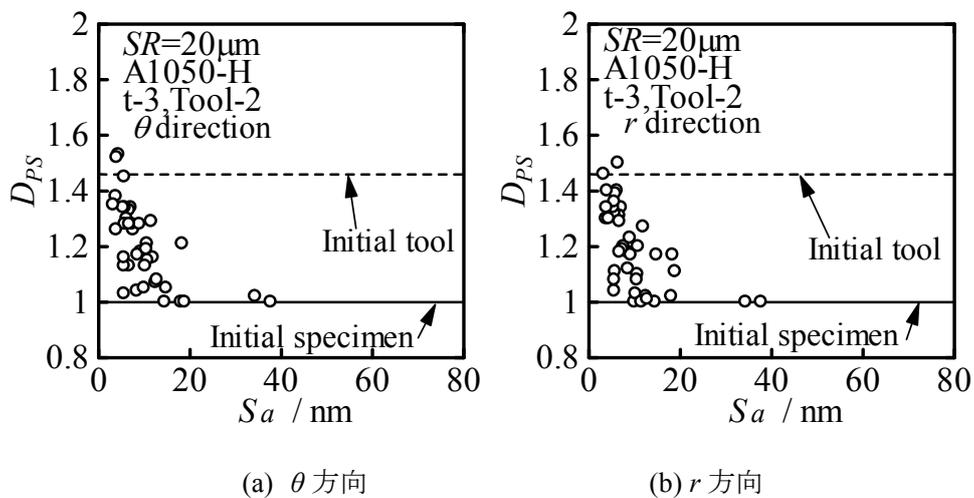
Fig.4.10 D_Z と算術平均面粗さ S_a の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)

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した。Fig. 4.11 に工具表面および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 $D_{PS}=1.46$ 、初期試験片の $D_{PS}=1.00$ であった。

Fig. 4.12 に t-3 の θ 方向、 r 方向における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 方向ともに圧縮率が高くなると D_{PS} が大きくなる傾向が見られる。

Fig.4.13 に t-3 の 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 が小さくなるほど D_{PS} は大きくなる傾向が見られる。

Fig.4.11 断面曲線および FFT 解析結果 ($e_c=40\%$, $r=3\text{mm}$, t-3, Tool-2, A1050-H)Fig.4.12 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)Fig.4.13 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)

4.5 DLC 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

4.5.1 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。工具初期表面 (Tool-1) の零点集合次元 $D_z=1.36$ ，試験片初期表面の $D_z=1.31$ であった。

Fig.4.14 に零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率が 30%程度までは圧縮率，測定箇所による違いは見られない。また高圧縮率で僅かに D_z が小さくなるが，はっきりとした規則性は見られない。

Fig.4.15 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。初期試験片，初期工具の平均の D_z の値よりも大きい場合が多いが， S_a とのはっきりとした規則性は見られない。

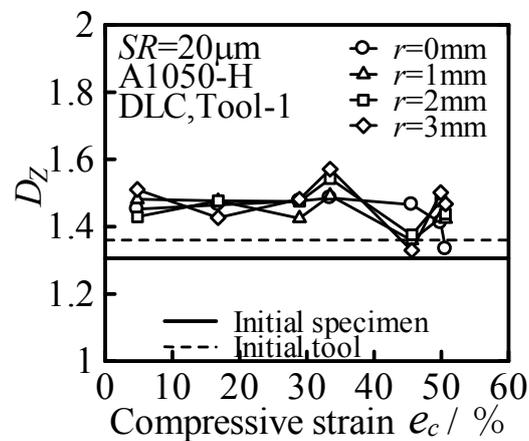


Fig.4.14 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)

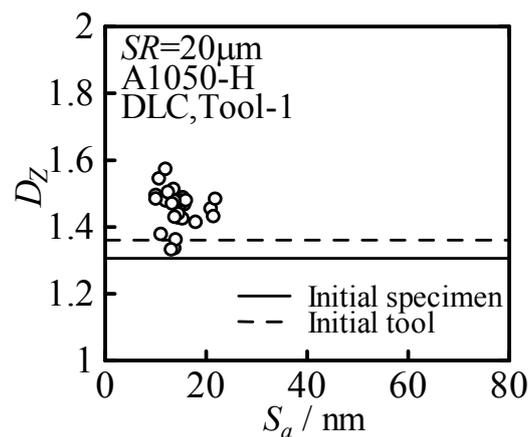


Fig.4.15 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)

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. 4.16 に工具表面および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-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. 4.17 に θ 方向, r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す。どの圧縮率でも D_{PS} は 1~1.4 程度の値になっているが、圧縮率や測定箇所でのばらつきが大きく、はっきりとした規則性が見られない。

Fig.4.18 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 が小さいとばらつきが大きい, S_a が大きいと D_{PS} は小さい傾向が見られる。

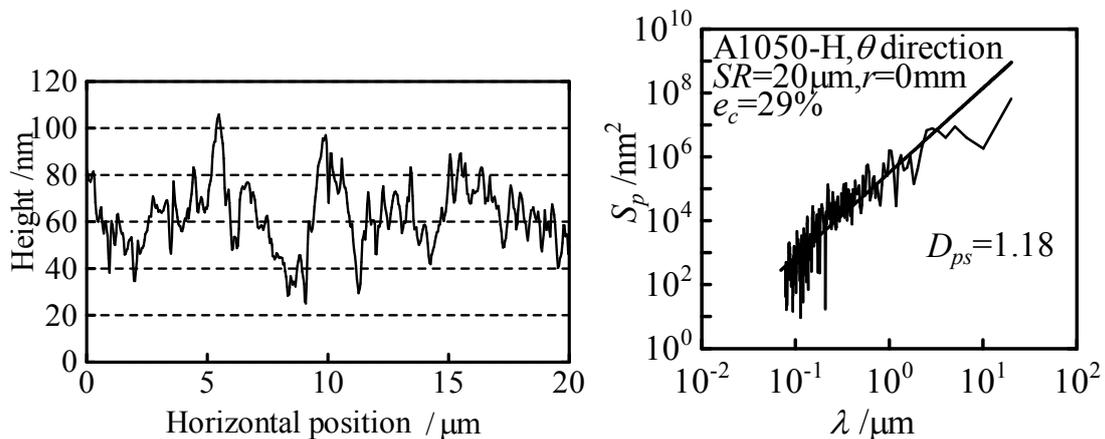


Fig.4.16 断面曲線および FFT 解析結果 ($e_c=29\%$, $r=0\text{mm}$, DLC, Tool-1, A1050-H)

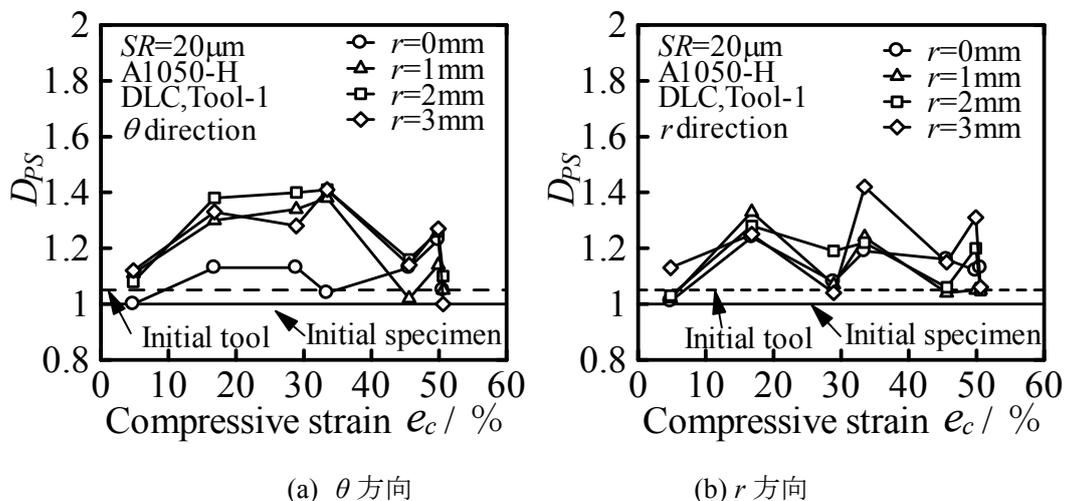


Fig.4.17 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)

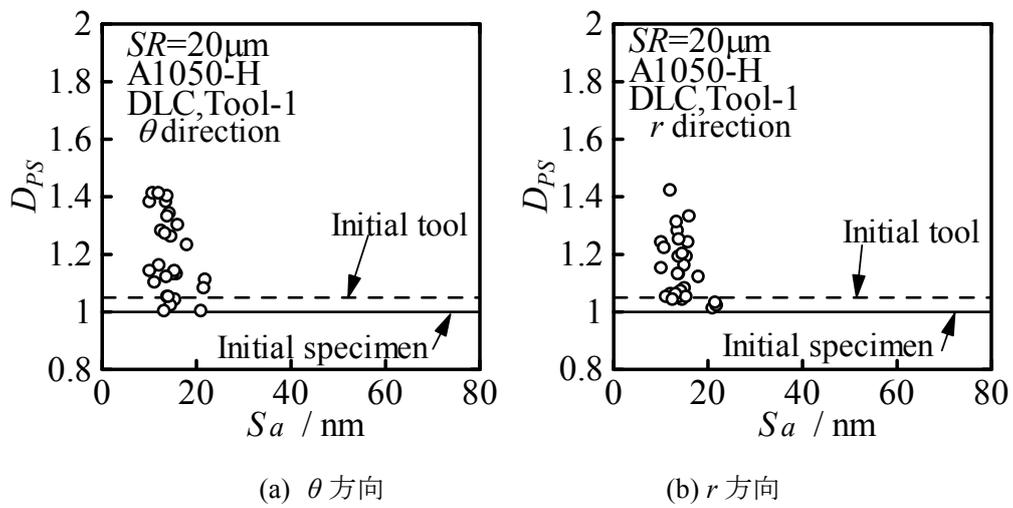


Fig.4.18 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)

4.6 DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$), A1050-H 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。なお、工具初期表面 (Tool-2) の零点集合次元 $D_z=1.31$ 、試験片初期表面の $D_z=1.31$ である。

Fig.4.19 に零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。初期試験片、初期工具の平均の D_z の値よりも大きい傾向があるが、圧縮率や測定箇所でのばらつきが大きく、はっきりとした規則性が見られない。

Fig.4.20 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 が小さいほどばらつきが大きくなるが、 S_a が小さいほど D_z が大きくなる傾向もみられる。

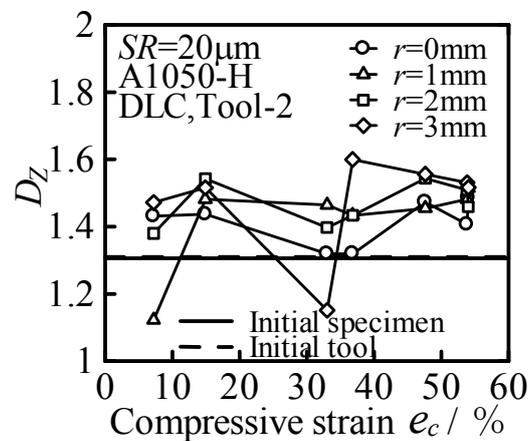


Fig.4.19 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

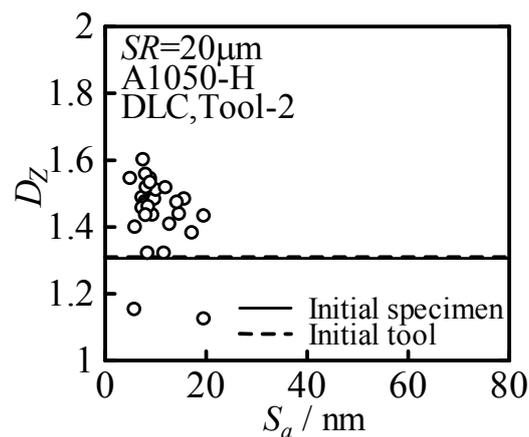


Fig.4.20 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

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

Fig. 4.21 に工具表面および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 $D_{PS}=1.46$, 初期試験片の $D_{PS}=1.00$ であった.

Fig. 4.22 に θ 方向, r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. どの圧縮率でも D_{PS} は 1~1.4 程度の値になっているが, 圧縮率や測定箇所でのばらつきが大きく, はっきりとした規則性が見られない.

Fig.4.23 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 が小さいほどばらつきが大きくなるが, S_a が大きいと D_{PS} が小さい傾向も見られる.

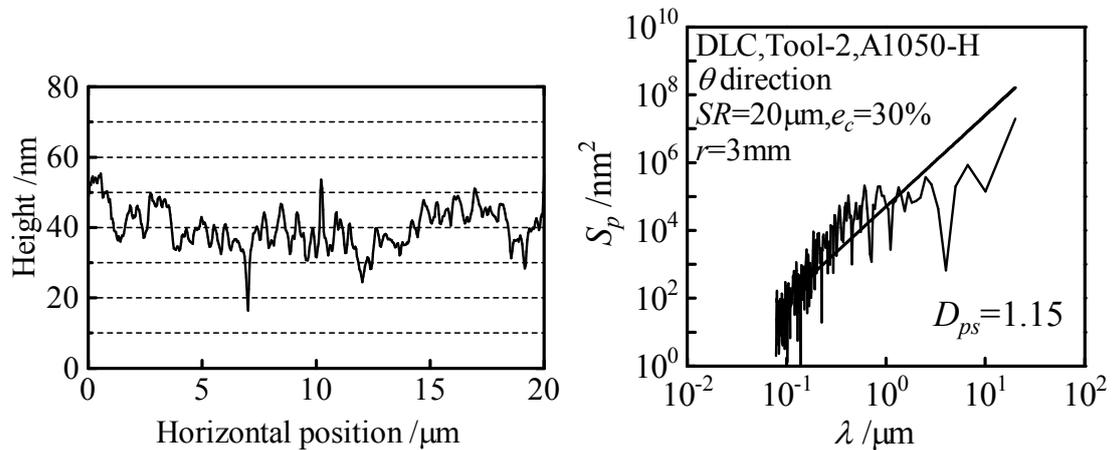


Fig.4.21 断面曲線および FFT 解析結果 ($e_c=30\%$, $r=3\text{mm}$, DLC, Tool-2, A1050-H)

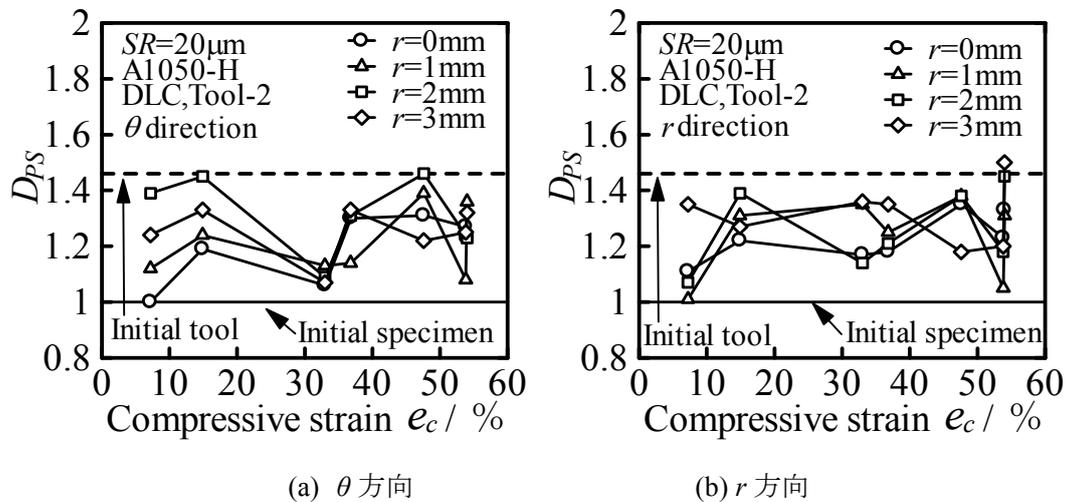


Fig.4.22 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

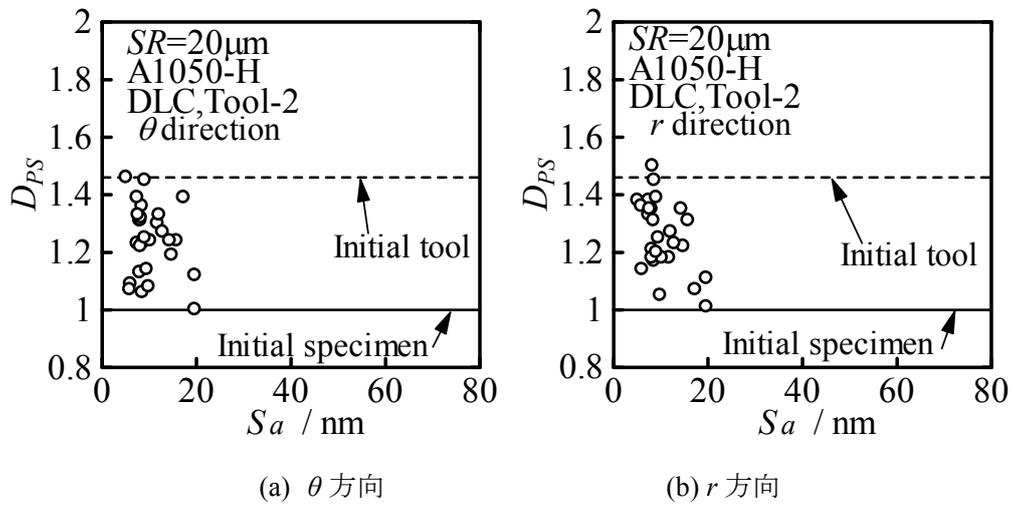


Fig.4.23 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

4.7 DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$), A1050-O における解析結果

4.7.1 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. なお, 工具初期表面 (Tool-2) の零点集合次元 $D_z=1.31$, 試験片初期表面の $D_z=1.31$ である.

Fig.4.24 に零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す. どの圧縮率でも D_z は 1.2~1.6 程度の値になっているが, 圧縮率や測定箇所でのばらつきが大きく, はっきりとした規則性が見られない.

Fig.4.25 に DLC 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. 初期試験片, 初期工具の平均の D_z の値よりも大きい場合が多いが, S_a が小さくなると測定箇所でのばらつきが大きく, はっきりとした規則性が見られない.

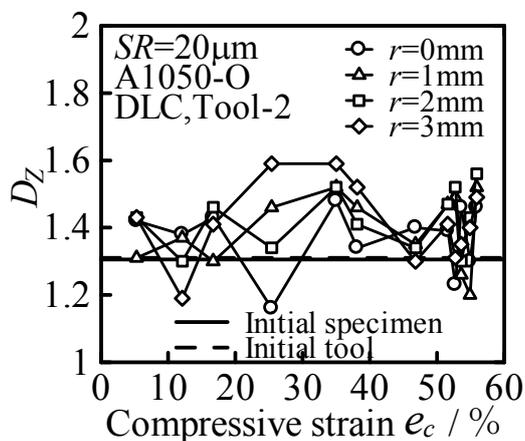


Fig.4.24 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)

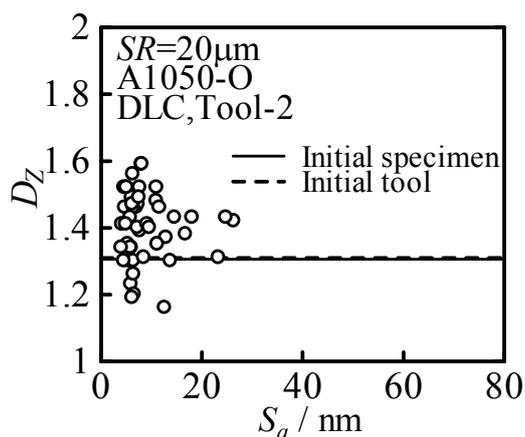


Fig.4.25 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)

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. 4.26 に工具表面および試験片表面の断面曲線と FFT 解析結果の一例を示す. FFT 解析の結果, 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, フラクタル性を有することが確認できる. 初期工具表面 (Tool-2) のパワースペクトル次元 $D_{PS}=1.46$, 初期試験片の $D_{PS}=1.00$ であった.

Fig. 4.27 に θ 方向, r 方向における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 方向において, 圧縮率が高くなると D_{PS} が大きくなる傾向が見られる. r 方向では大きな違いは見られない.

Fig.4.28 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 が小さくなるほど D_{PS} は大きくなる傾向が見られる.

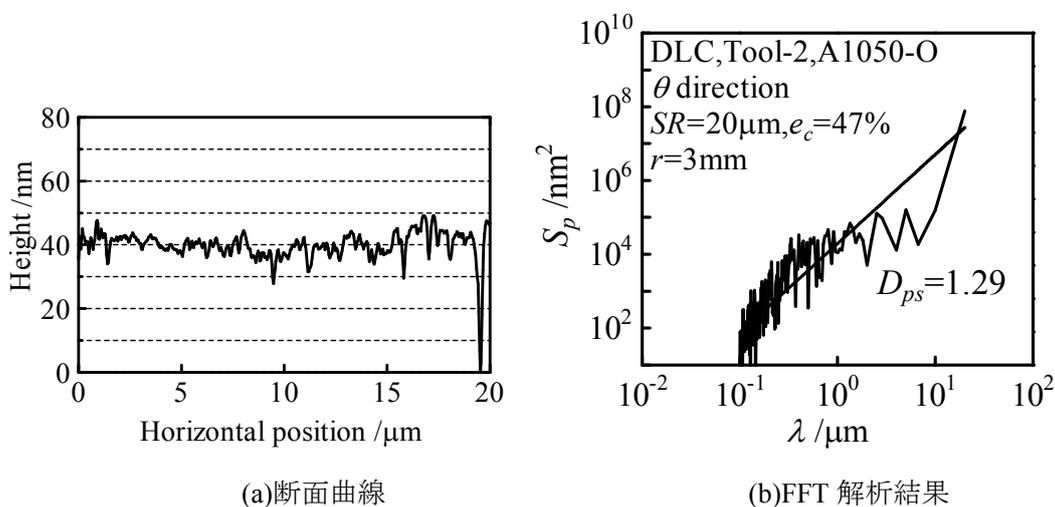


Fig.4.26 断面曲線および FFT 解析結果 ($e_c=47\%$, $r=3\text{mm}$, DLC, Tool-2, A1050-O)

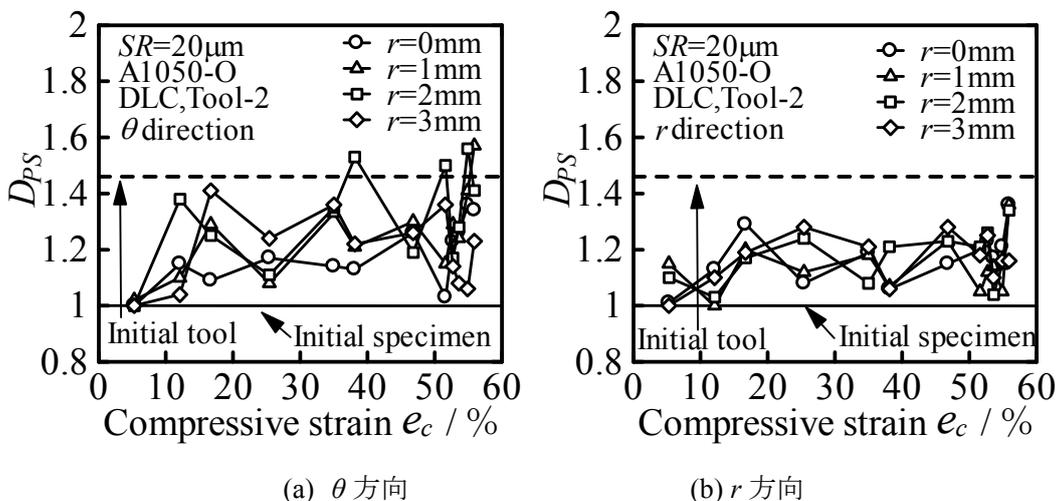


Fig.4.27 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)

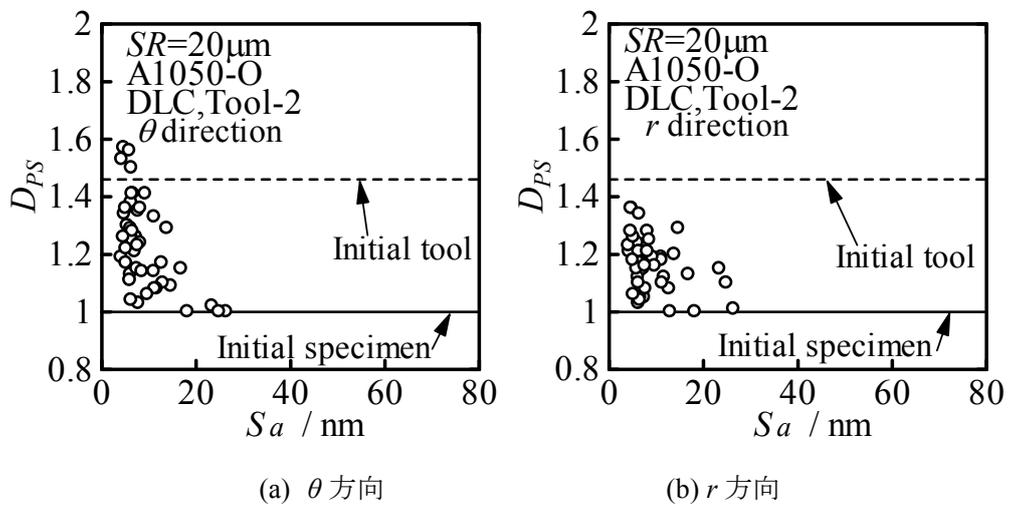


Fig.4.28 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)

4.8 各条件における解析結果

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.4.29 にこれまでに行ってきた条件での零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれもばらつきが大きいですが、どの条件でも D_z と e_c の関係性は見られない。

Fig.4.30, Fig.4.31 にこれまでに行ってきた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。いずれの条件でも S_a が小さいとばらつきが大きいですが S_a が大きいと初期試験片、初期工具のみに近づく傾向が見られる。また、工具表面粗さ、加工硬化、工具表面膜の違いによる影響は見られなかった。

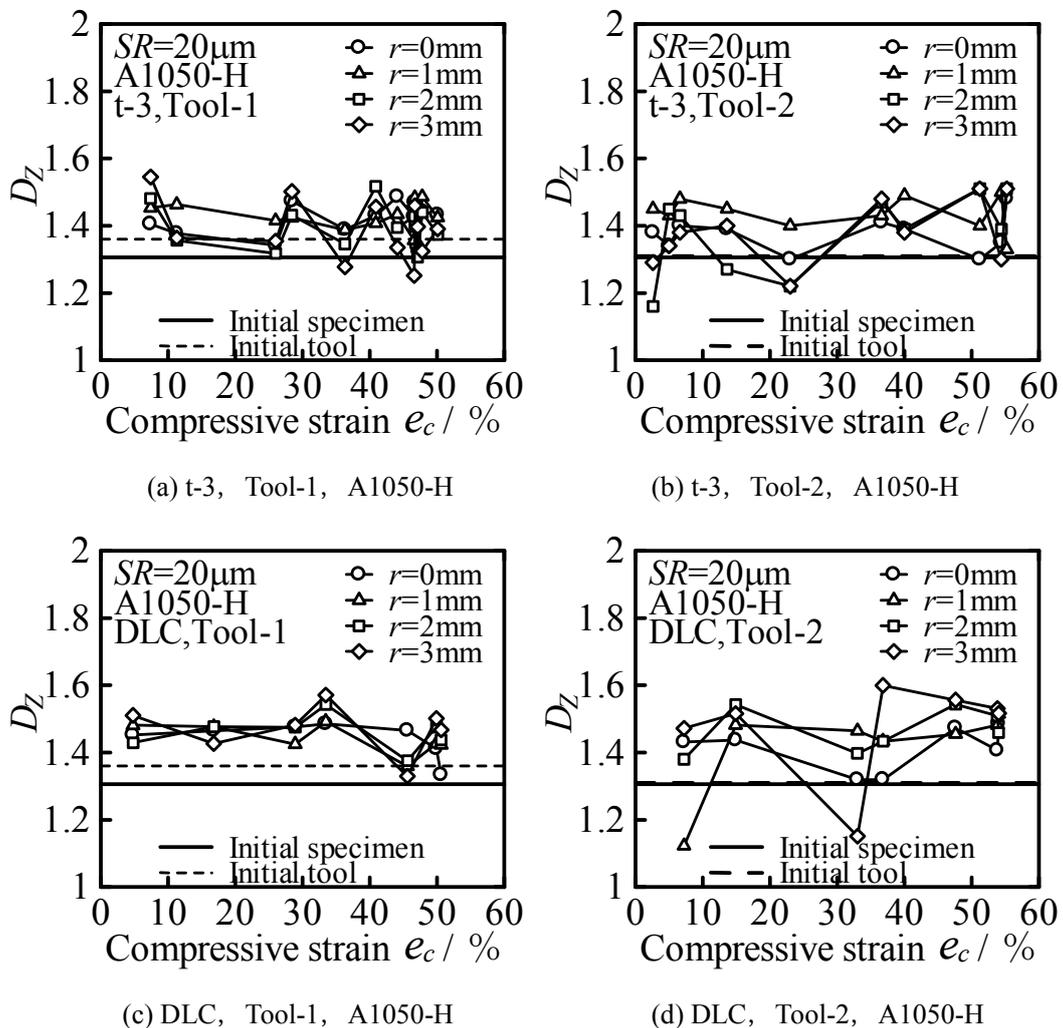
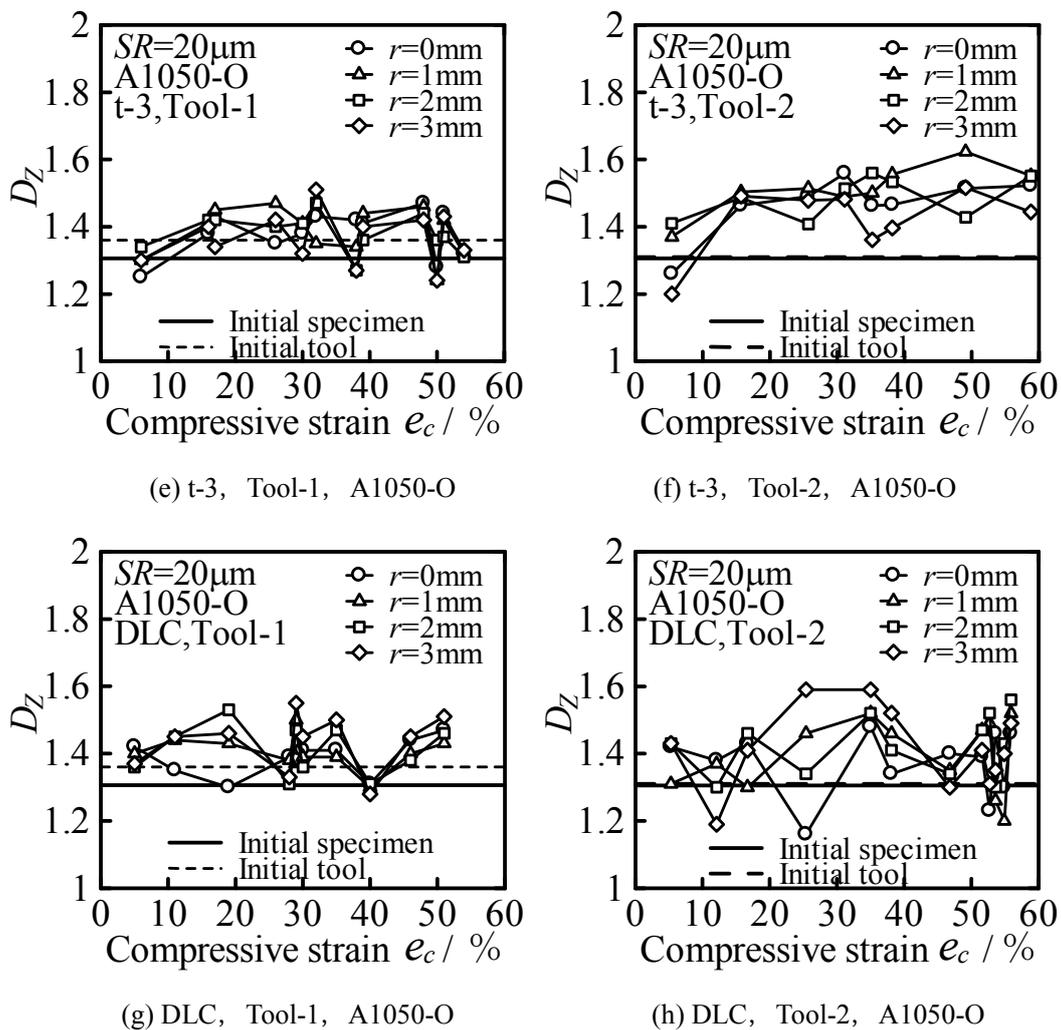
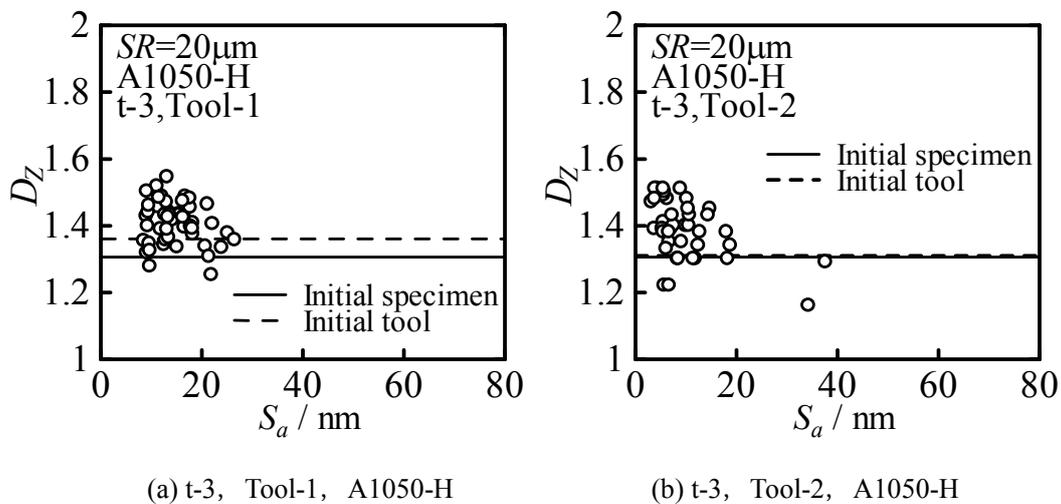
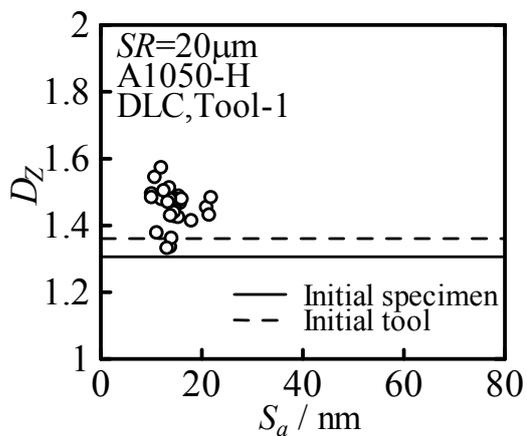
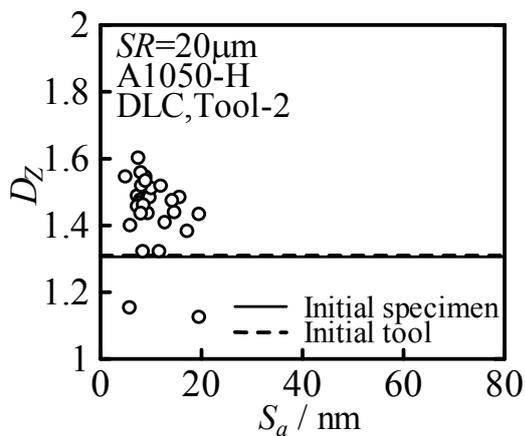


Fig.4.29 D_z と圧縮率 e_c の関係

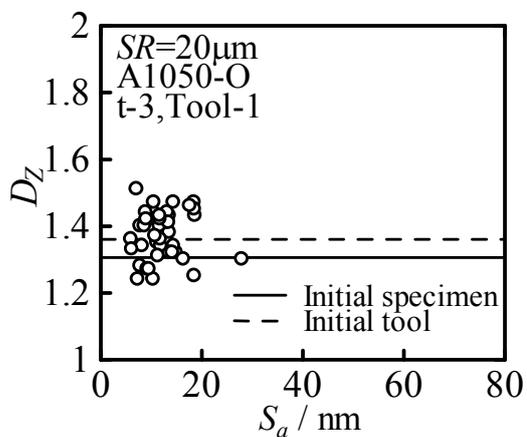
Fig.4.29 D_z と圧縮率 e_c の関係Fig.4.30 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係



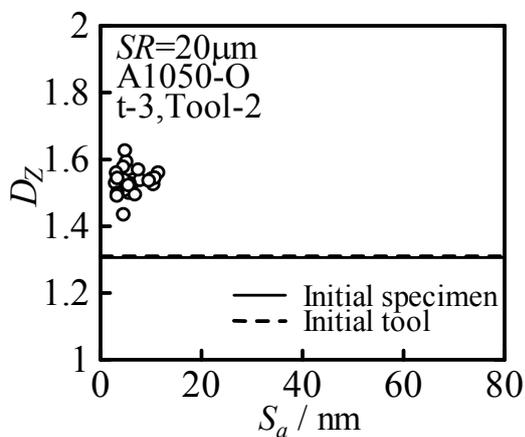
(c) DLC, Tool-1, A1050-H



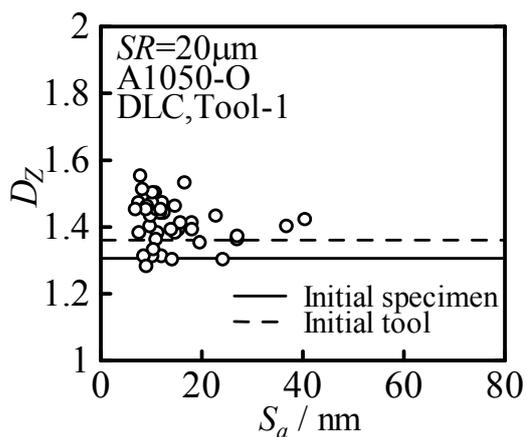
(d) DLC, Tool-2, A1050-H



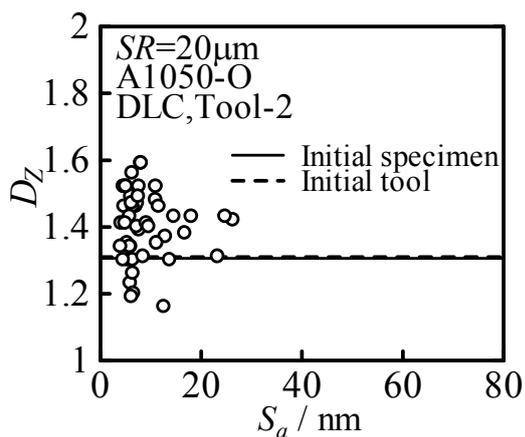
(e) t-3, Tool-1, A1050-O



(f) t-3, Tool-2, A1050-O

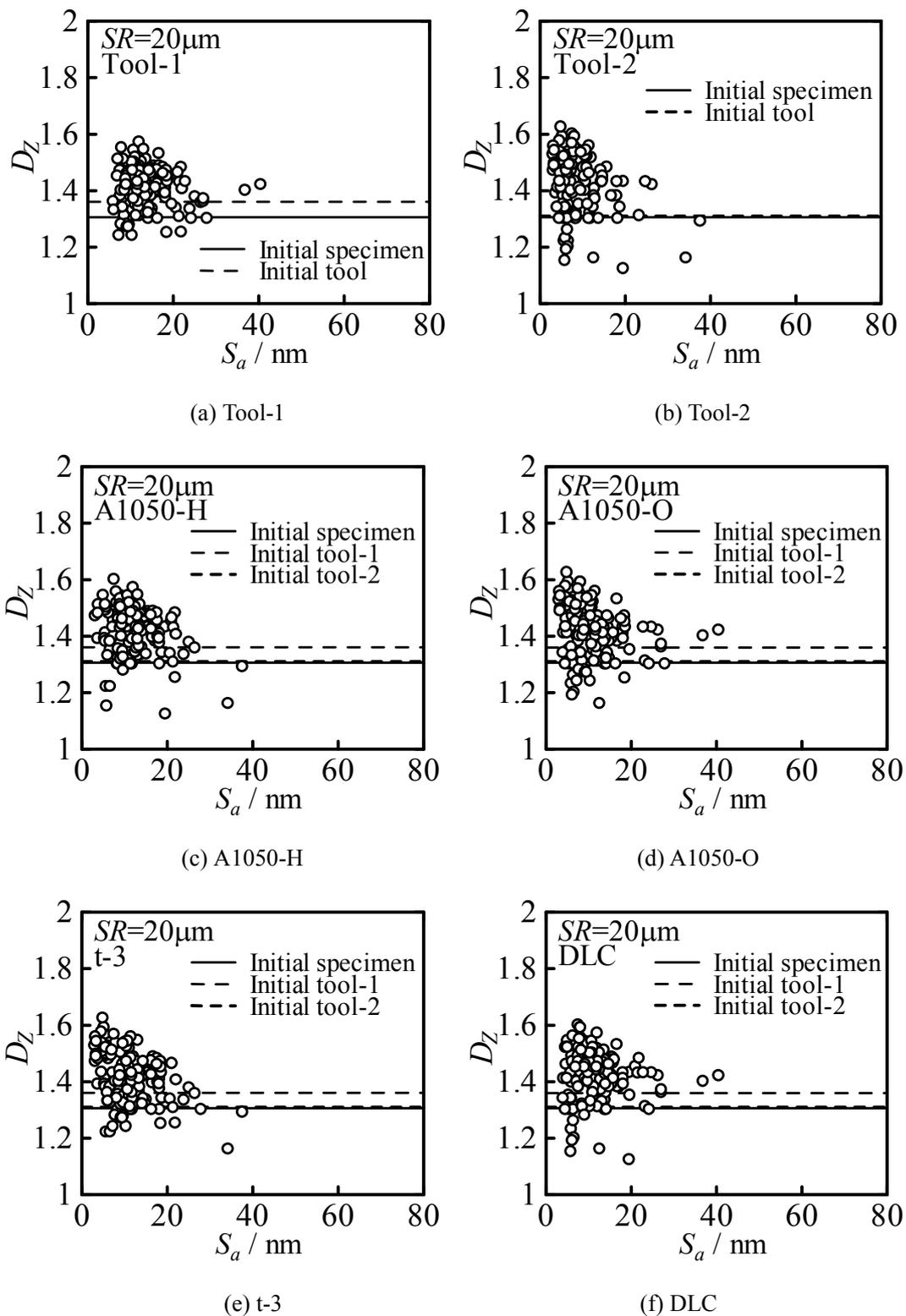


(g) DLC, Tool-1, A1050-O



(h) DLC, Tool-2, A1050-O

Fig.4.30 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係

Fig.4.31 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. 4.32~39 にこれまでに行ってきた条件での θ 方向, r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. どの条件においても D_{PS} と e_c の明らかな関係性は見られない. また, t-3, Tool-2 では圧縮率が高くなると D_{PS} が大きくなり初期工具の D_{PS} に近づく傾向が見られる.

Fig.4.40~47 にこれまでに行ってきた条件での 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. どの条件においても θ 方向, r 方向ともに, S_a が小さいとばらつきが大きい, S_a が大きいと D_{PS} は小さい傾向が見られる.

次に工具表面粗さ, 加工硬化, 工具表面膜の違いによる影響を調べるためにそれぞれの条件ごとにまとめ, 比較する. Fig.4.48 にこれまでに行ってきた条件での 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 Tool-1, Tool-2 で比較したものを示す. S_a の小さい範囲では Tool-2 の D_{PS} が大きいように見えるが, Tool-2 は Tool-1 より平滑化が可能であり, より S_a の小さい範囲までプロットできるためと考えられる. その他の部分では大きな違いは見られない.

Fig.4.49 にこれまでに行ってきた条件での 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 A1050-O, A1050-H で比較したものを示す. O 材と H 材ではほぼ同様の値となっており, 大きな違いは見られない.

Fig.4.50 にこれまでに行ってきた条件での 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 t-3, DLC で比較したものを示す. t-3 と DLC ではほぼ同様の値となっており, 大きな違いは見られない.

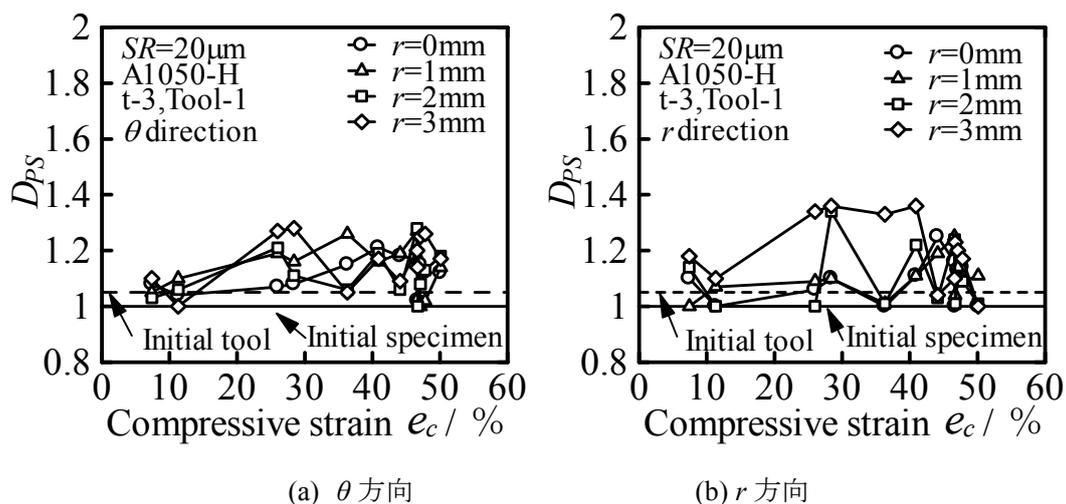
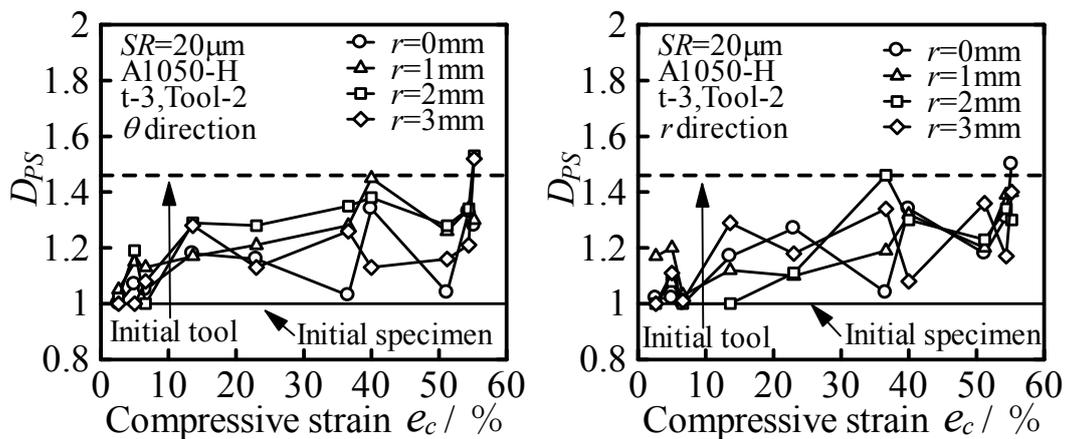
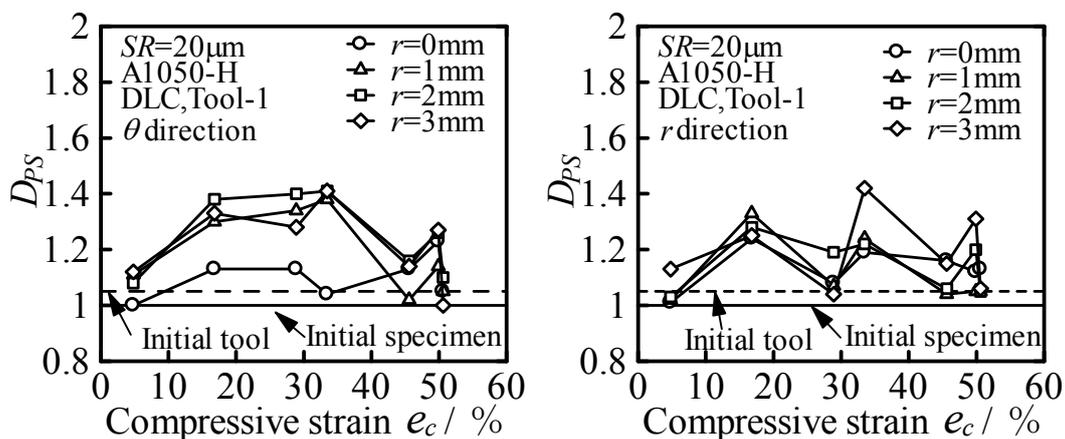
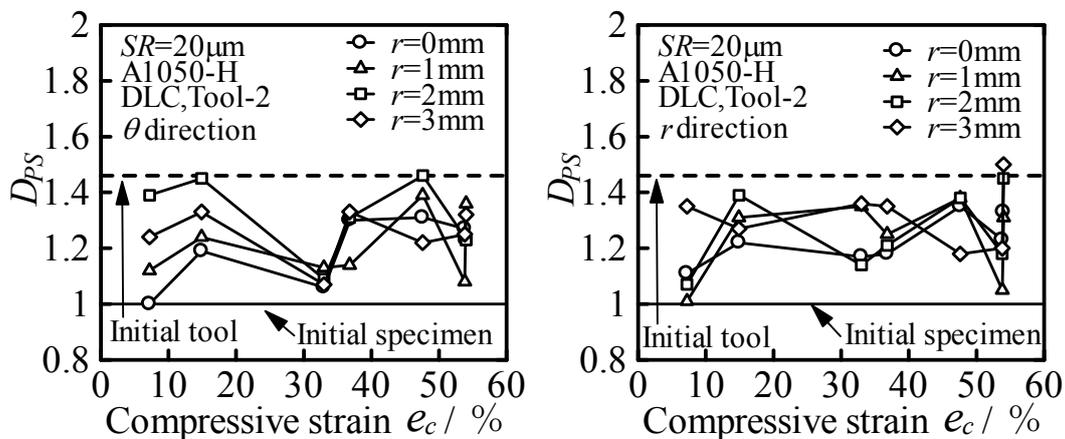
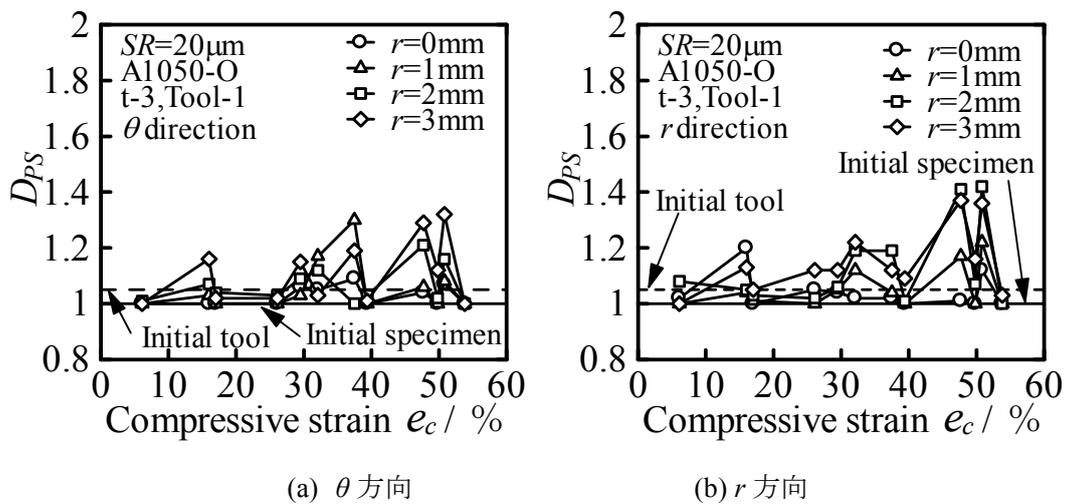
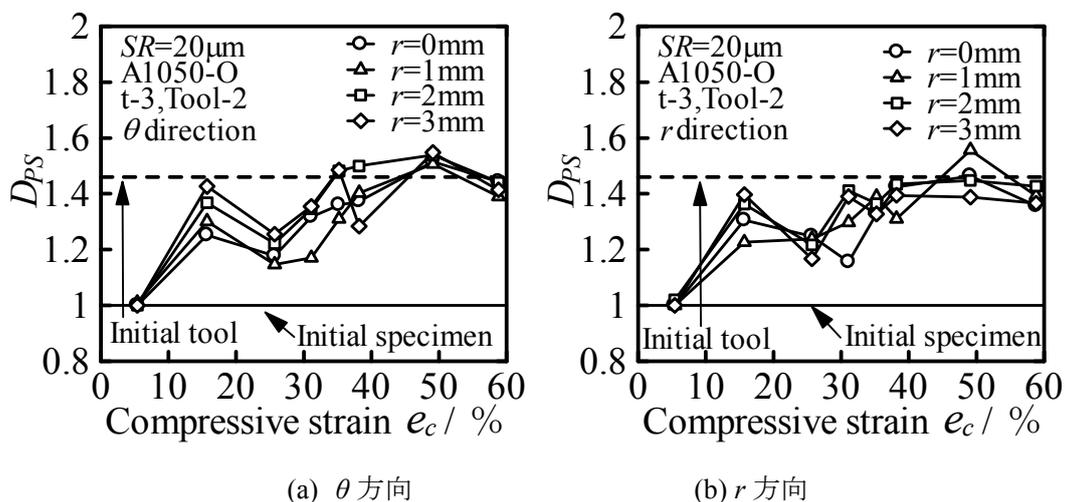
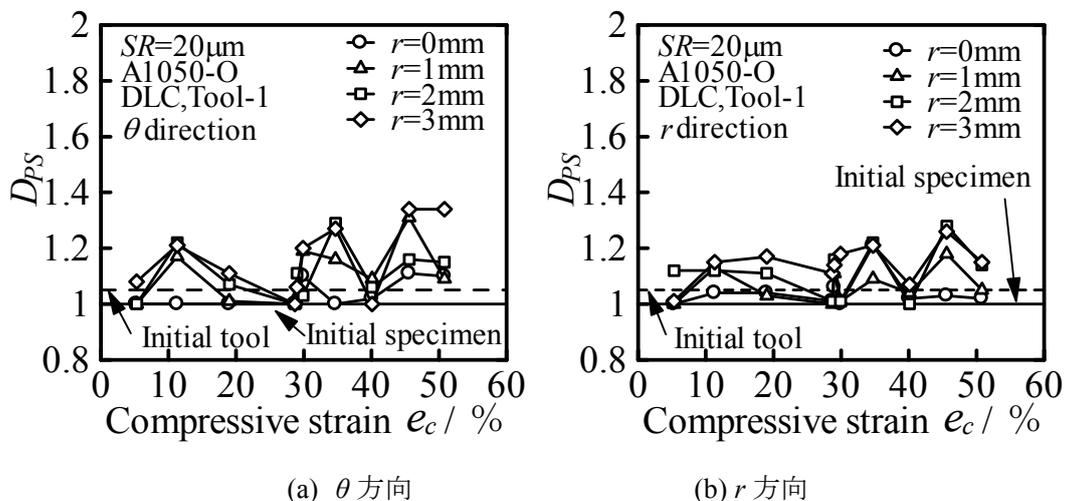
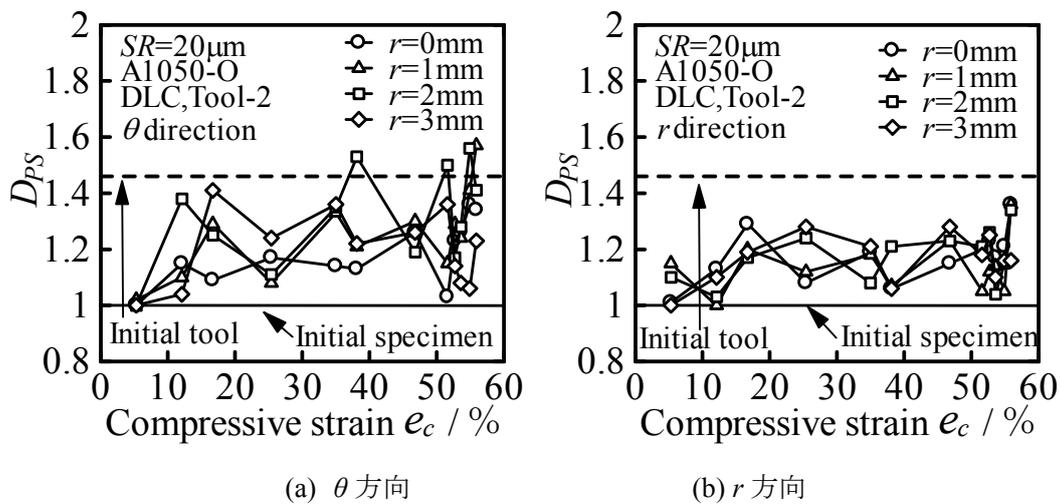
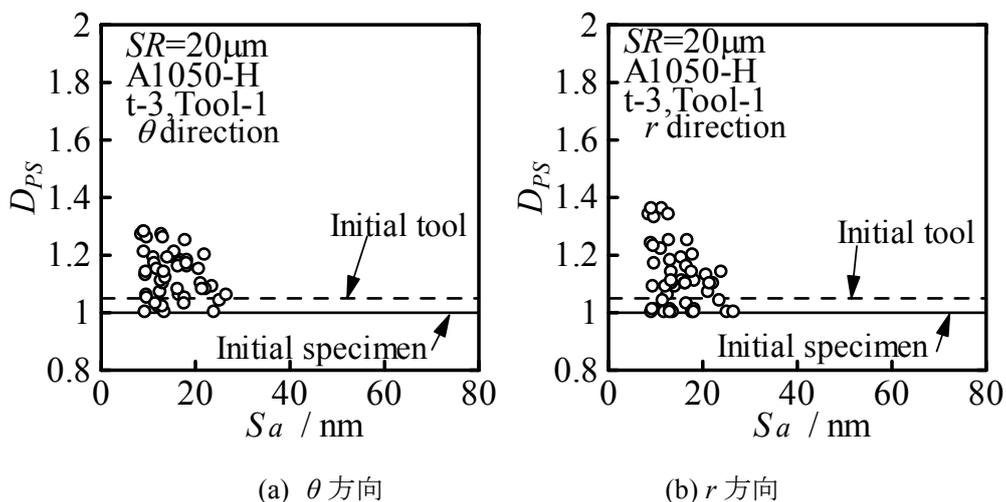
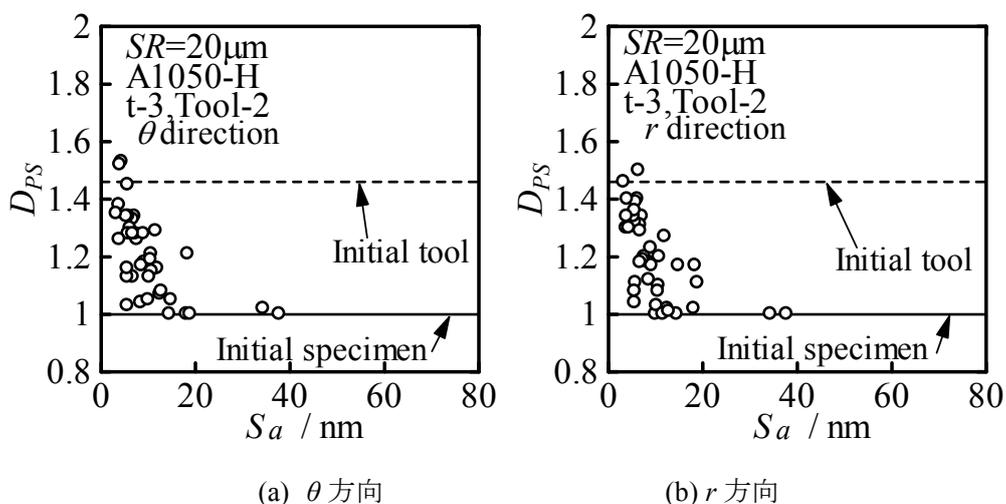
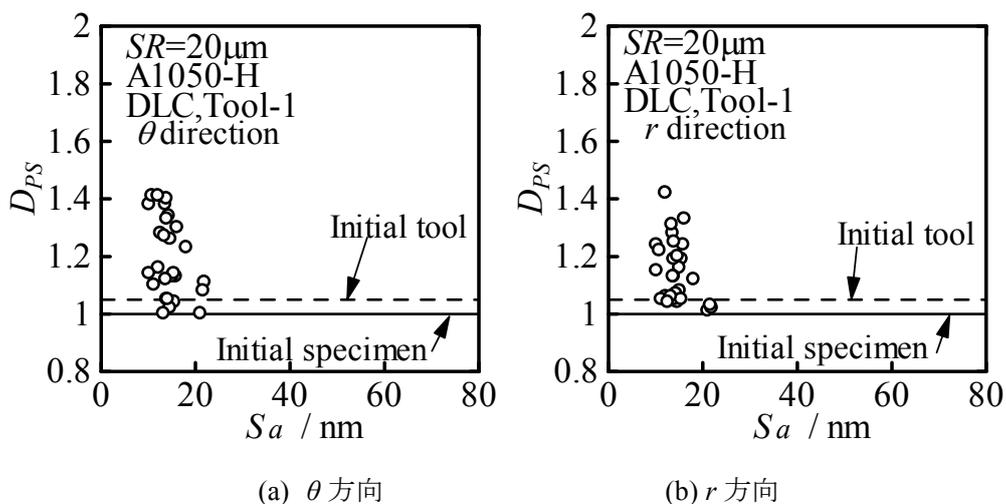
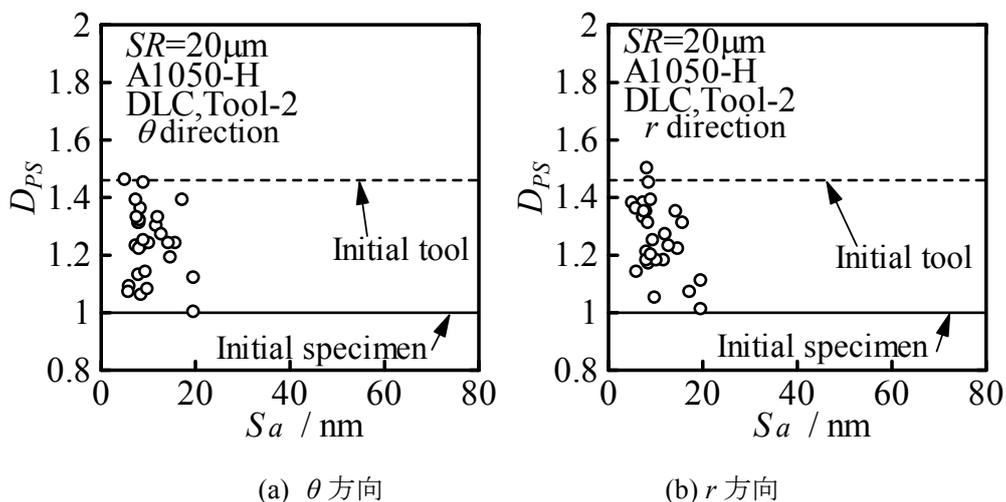
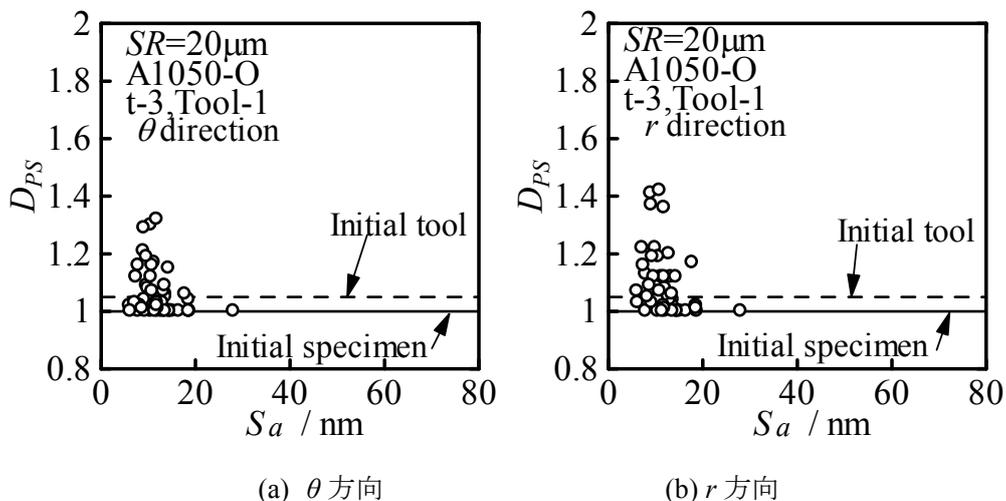


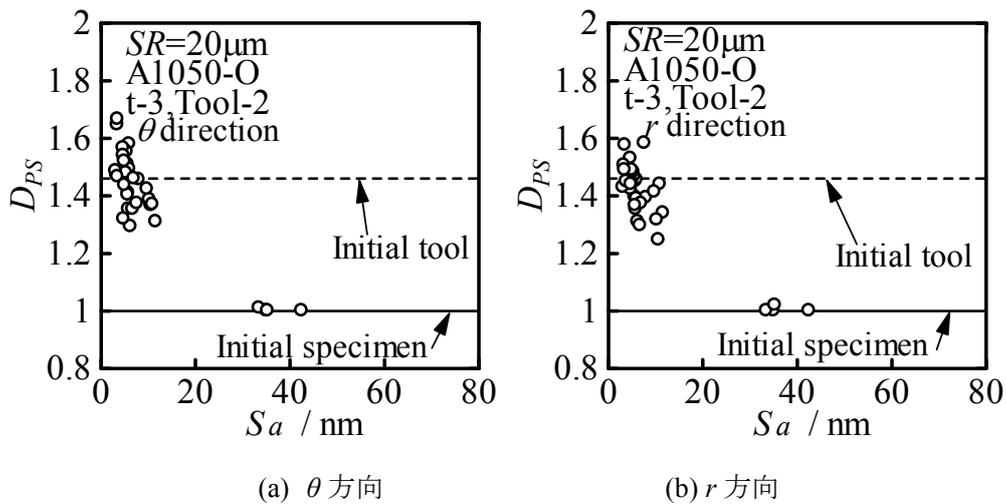
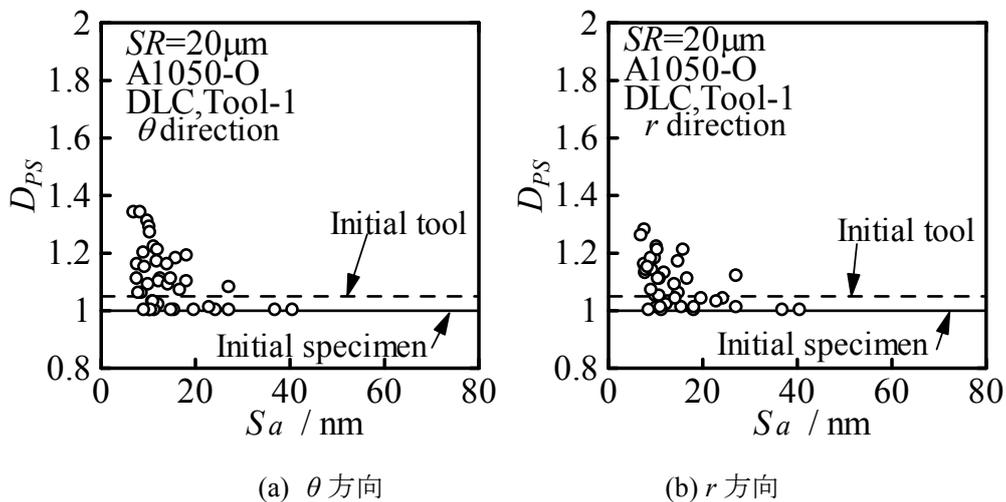
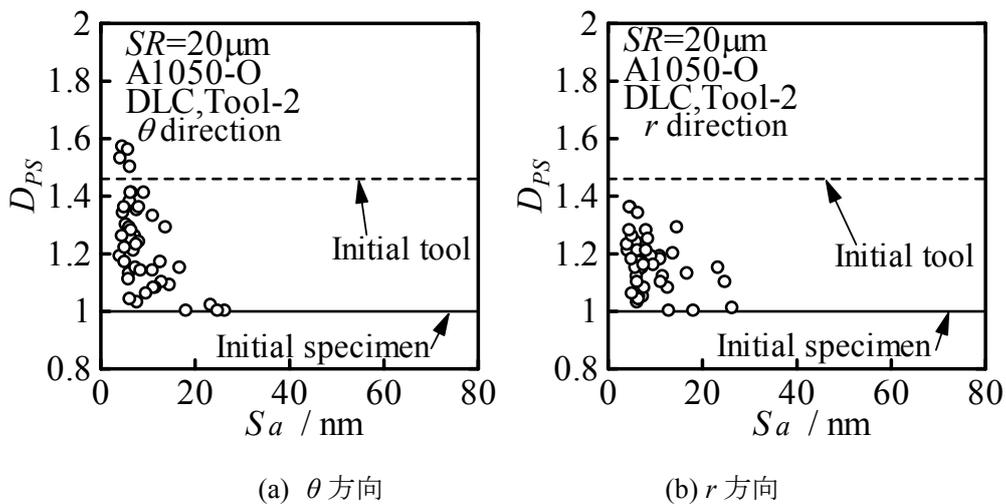
Fig.4.32 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (t-3, Tool-1, A1050-H)

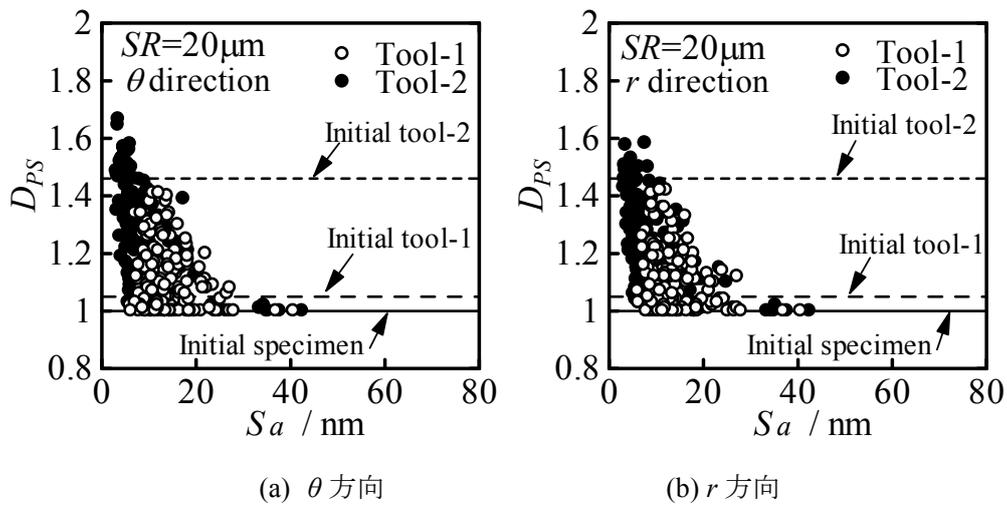
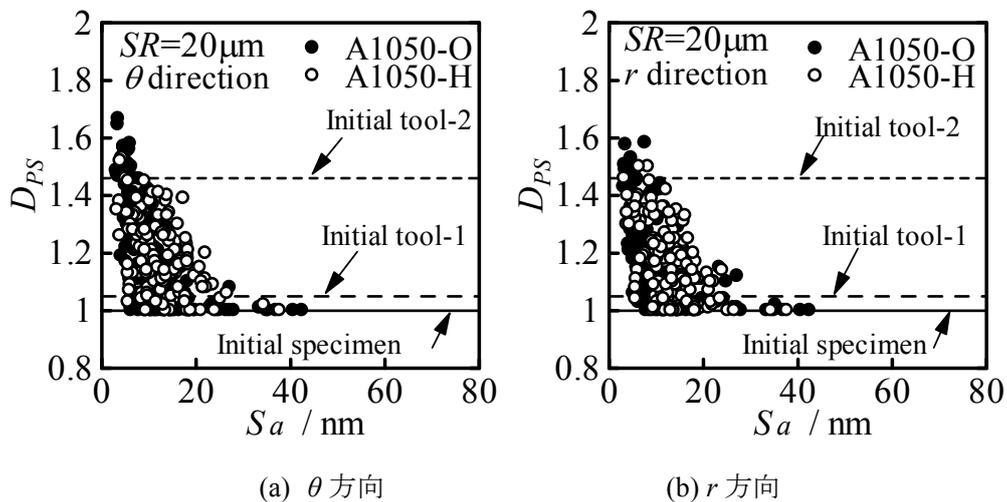
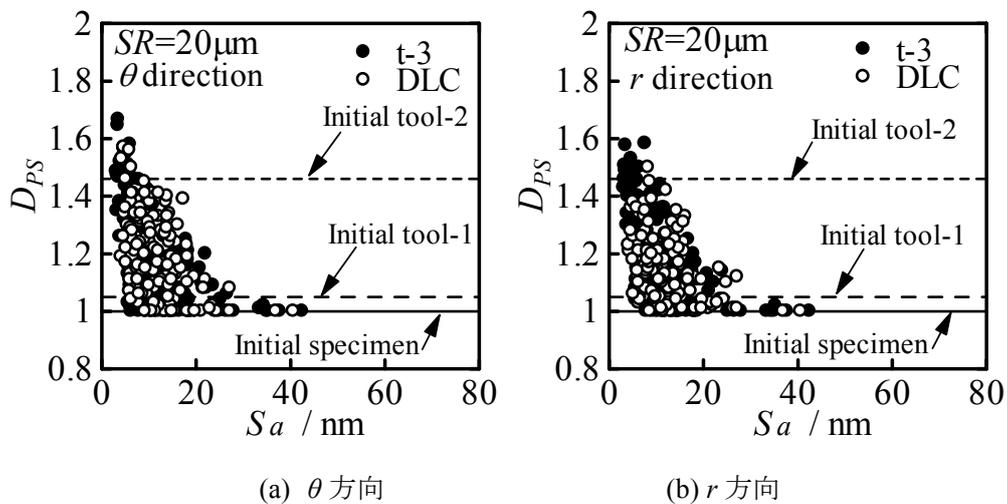
(a) θ 方向(b) r 方向Fig.4.33 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)(a) θ 方向(b) r 方向Fig.4.34 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)(a) θ 方向(b) r 方向Fig.4.35 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)

Fig.4.36 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (t-3, Tool-1, A1050-O)Fig.4.37 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (t-3, Tool-2, A1050-O)Fig.4.38 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A1050-O)

Fig.4.39 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)Fig.4.40 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (t-3, Tool-1, A1050-H)Fig.4.41 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (t-3, Tool-2, A1050-H)

Fig.4.42 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-1, A1050-H)Fig.4.43 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, A1050-H)Fig.4.44 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (t-3, Tool-1, A1050-O)

Fig.4.45 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (t-3, Tool-2, A1050-O)Fig.4.46 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-1, A1050-O)Fig.4.47 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, A1050-O)

Fig.4.48 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-1, Tool-2)Fig.4.49 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (A1050-H, A1050-O)Fig.4.50 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (t-3, DLC)

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、アルミニウム引抜き材(H材)およびアルミニウム焼なまし材(O材)について $R_a=10\text{nm}$ (Tool-1)または $R_a=5\text{nm}$ (Tool-2)の工具表面に潤滑剤として膜厚 $t=100\text{nm}$ の DLC(Diamond Like Carbon) コーティングまたは膜厚 $t=40\text{nm}$ のカーボン蒸着を施した工具(t-3)を用いて圧縮加工を行い、工具表面粗さ、加工硬化、工具表面膜種の違いによる影響について検討した。さらに表面粗さ計・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、加工硬化、工具表面膜種、工具表面粗さの影響について検討した。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) カーボン蒸着工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$)、t-3 (膜厚 $t=40\text{nm}$)、A1050-H の場合、低圧縮率であっても平滑化が進む。低圧縮率では中心部の高面圧による転写効果が外周部の材料流動によるしごき効果よりも大きいため、外周部よりも中心部の方が平滑化が進む傾向がある。圧縮率が 20%を超えると中心部よりも外周部の方が平滑化が進み、圧縮率 50%以上の高圧縮率ではカーボン蒸着膜の剥離により平滑度が悪くなる場合がある。
- (2) DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$)、A1050-H の場合、低圧縮率でも初期試験片に比べ大きく平滑化される。いずれの圧縮率においても中心部より外周部で平滑化される傾向が見られ、圧縮率が 30%付近で最も平滑化され、初期工具と同等の平滑度が得られる。また、工具表面状態の悪化により 50%付近では僅かに平滑度が悪くなる。
- (3) DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$)、A1050-H の場合、低圧縮率でも初期試験片に比べ大きく平滑化されるが、初期工具ほどの平滑度は得られない。圧縮率が 40%程度までは中心部より外周部で平滑化され、圧縮率が 50%を超えると工具表面状態の悪化により外周部で平滑度が悪くなる場合もある。
- (4) DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$)、A1050-O の場合、圧縮率が大きくなるにつれ平滑化される傾向があるが、初期工具ほどには平滑化されない。低圧縮率で中心部より外周部のほうが S_a が小さくなる傾向もある。面圧のそれほど大きくない低圧縮率では潤滑状態が良く中心部での転写効果よりも外周部でのしごき効果による影響が大きいためと考えられる。高圧縮率の外周部では工具表面状態の悪化により平滑度が悪くなる場合もある。
- (5) 工具表面粗さの違いについて、いずれの条件でも明らかに表面粗さの大きい Tool-1 に比べ表面粗さの小さい Tool-2 は平滑化される。しかし、Tool-1 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、Tool-2 では初期工具ほどの平滑度が得られない。

- (6) 加工硬化について、いずれの条件でも低圧縮率において、H材の方が加工初期の変形抵抗が大きく、面圧が大きくなるため、転写効果が大きくなり、O材よりH材の方が平滑化が進む。また、O材はH材に比べ高圧縮率で平滑化が進む傾向がある。これはH材はO材に比べ高圧縮率で剥離など工具表面状態の悪化が生じやすいためと考えられる。
- (7) 工具表面膜の違いについて、剥離等の発生しない中心部や圧縮率50%以下では大きな違いは見られなかった。カーボン蒸着(t-3)の高圧縮率の外周部では、Tool-1はO材、H材どちらも大きく剥離し、Tool-2は僅かに剥離が発生した。さらにH材において剥離による影響で平滑度が悪くなる場合があるが、O材ではその影響が少なく高圧縮率でも平滑化が進んだ。DLCのTool-1においては剥離などにより平滑度が悪くなることは無かったが、Tool-2では高圧縮率の外周部で工具表面状態の悪化により平滑度が悪くなる傾向が見られた。
- (8) カーボン蒸着(t-3)はTool-1よりもTool-2に蒸着した方が剥離しにくく、DLCはTool-2よりもTool-1にコーティングした方が工具表面状態の悪化を抑えることができる。また、DLCはt-3に僅かに劣る平滑度となったが、工具表面状態の影響が無い箇所ではt-3とほぼ同程度の平滑度が得られる。
- (9) DLC、Tool-2、H材を用いて同一の工具で繰り返し試験を行った結果、1度の試験で1つの工具を使用した場合と同様の平滑度が得られた。1度の試験で少なからず剥離が発生するカーボン蒸着に対してDLCは剥離などの工具表面状態の変化が少なく、t-3とほぼ同等の平滑度が得られるため、複数回圧縮を行う場合はDLCを用いると良いと考えられる。
- (10) 本研究の範囲では、表面粗さの小さいTool-2に膜厚40nmのカーボン蒸着を行い、O材を49%圧縮した場合に最も平滑な面を得ることができた。Tool-1よりもTool-2を用いた方がより平滑化が進み、さらにH材よりもO材を用いた方が剥離等が発生しにくいため、O材を用いた方が良いと考えられる。
- (11) フラクタル解析を行った結果、零点集合次元 D_z は、いずれの条件でも加工することで大きくなる傾向が見られた。パワースペクトル次元 D_{PS} は、いずれも表面粗さ 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。また、工具表面粗さ、加工硬化、工具表面膜の違いによる影響は見られなかった。

[参考文献]

- (1) 佐藤 一雄：マイクロ・ナノ工学の展望，日本機械学会誌，116 巻，1130 号(2013)，12.
- (2) 田中 克敏：超精密加工機械の最近の動向および展望，日本機械学会論文集，75 巻，757 号(2009)，2369-2378.
- (3) 王 志剛：塑性加工における超平滑面創成機構，塑性と加工，44 巻，515 号 (2003)，1159-1163.
- (4) 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.
- (5) 田中 秀岳，田太 博章，柳 和久，二村 優：高硬度鋼材表面仕上げにおける前加工の表面性状がバニシング加工面へ及ぼす影響—ダイヤモンドチップバニシング工具を用いた高硬度鋼材表面仕上げに関する研究—，塑性と加工，50 巻，581 号 (2009)，555-559.
- (6) 高田 義正，笹原 弘之：二重らせん摩擦攪拌形バニシングによる表面改質：バニシング工具先端形状が表面粗さ・硬さ・残留応力に及ぼす影響(OS3 工具・ツーリング(2))，生産加工・工作機械部門講演会：生産と加工に関する学術講演会，2010 巻，8 号 (2010)，89-90.
- (7) 中野 元裕，植木 啓文，宇都宮 裕：タンデムパス伸線条件が Ni めっき鋼線の表面光沢に及ぼす影響，塑性と加工，52 巻，602 号(2011)，365-369.
- (8) 梶野 智史，畠山 知浩，田村 容子，大澤 優樹，清水 了，村岡 太郎，浅川 基男：微小段付きダイス伸線による棒線材の超平滑化，塑性と加工，52 巻，602 号(2011)，370-374.
- (9) 安部 洋平，池田 豊，森 謙一郎：超高張力鋼板の破断面平滑加工による穴広げ性の向上，塑性と加工，52 巻，603 号(2011)，485-489.
- (10)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.
- (11)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.
- (12)田中 秀岳，西中 耕一，柳 和久：静油圧を用いたダイヤモンドチップバニシング工具の加工特性—断続面加工用油圧バニシング工具の開発—，塑性と加工，53 巻，621 号 (2012)，924-928.
- (13)Yang Bai, Ming Yang: Influence of ultrasonic vibration on metal foils surface finishing with micro-forging, *Procedia Engineering*, Vol. 81 (2014), 1475-1480.
- (14)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).
- (15)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).
- (16)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).
- (17)戸田耕平, 塑性加工による超平滑面の創成, 平成 18 年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2006).
- (18)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).
- (19)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).
- (20)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).
- (21)山本祐真, アルミニウムの圧縮加工による超平滑面創成に関する研究, 平成 25 年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2013).
- (22)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)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).
- (24)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.
- (25)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.
- (26)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), 18-20.
- (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), 23-24.
- (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), 24-27.
- (29)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
- (30)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.
- (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), 32-34.
- (32)B.B.Mandelbrot: The Fractal Geometry of Nature, (1982), 4-5.
- (33)高安秀樹: フラクタル, 朝倉書店, (1986), 1-18.
- (34)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.
- (35)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、牧清二郎教授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井手寿美氏、岩崎達洋氏、辻桃馬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。