

平成 29 年度 修士論文

圧縮加工における工具表面状態と 超平滑化の関係

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

岩崎 達洋

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 HA-DLC コーティング	9
2.2.4 Me-DLC コーティング	10
2.2.5 カーボン蒸着による表面状態の影響	10
2.2.6 DLC コーティングによる表面状態の影響	12
2.3 圧縮試験	14
2.3.1 圧縮試験装置	14
2.3.2 圧縮試験条件	16
2.4 触針式表面粗さ計(Surftest SJ-400)による評価方法	16
2.5 原子間力顕微鏡(AFM)による観察方法	17
2.6 工具表面のカーボン膜剥離面積率の測定	19
2.7 DLC 工具表面の撮影方法	19
2.8 有限要素法(FEM)解析	21
2.8.1 解析モデルと条件	21
2.8.2 摩擦係数 μ の決定方法	22
2.8.3 相対すべり量 L_s と工具接触面圧 p の計算	24
第 3 章 圧縮加工による平滑化挙動	25
3.1 カーボン蒸着工具 Tool-1($R_a=10\text{nm}$),t-4(膜厚 $t=100\text{nm}$),A1050-H における実験結果	6
3.1.1 圧縮率と表面粗さの関係	26
3.1.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	29
3.1.3 有限要素法(FEM)解析結果	34
3.2 カーボン蒸着工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$),t-4(膜厚 $t=100\text{nm}$),A1050-H における実験結果	7
3.2.1 圧縮率と表面粗さの関係	37
3.2.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	40

3.2.3	有限要素法(FEM)解析結果	44
3.3	Me-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	4
3.3.1	圧縮率と表面粗さの関係	46
3.3.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	48
3.3.3	有限要素法(FEM)解析結果	52
3.4	カーボン蒸着工具における工具表面粗さの影響	54
3.4.1	圧縮率と表面粗さの関係	54
3.4.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	58
3.5	カーボン蒸着膜厚の影響	61
3.5.1	圧縮率と表面粗さの関係	61
3.5.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	63
3.6	工具表面膜種の影響	65
3.6.1	圧縮率と表面粗さの関係	65
3.6.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	67
第 4 章	加工品表面のフラクタル解析	70
4.1	フラクタルの説明	70
4.2	フラクタル次元の決定法	72
4.2.1	零点集合次元	72
4.2.2	パワースペクトル次元	73
4.3	AFM システムにおけるフラクタル次元の測定法	76
4.3.1	零点集合次元 D_Z の測定法	76
4.3.2	パワースペクトル次元 D_{PS} の測定法	79
4.4	カーボン蒸着工具 Tool-1($R_a=10\text{nm}$),t-4(膜厚 $t=100\text{nm}$),A1050-H における解析結果	7
4.4.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	79
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	80
4.5	カーボン蒸着工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$),t-4(膜厚 $t=100\text{nm}$),A1050-H における解析結果	8
4.5.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	82
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	83
4.6	Me-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	84
4.6.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	84
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	85
4.7	カーボン蒸着膜厚の影響	87

4.7.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	87
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	91
4.8	工具表面膜種の影響	97
4.8.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	97
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	99
第5章 結論		104
参考文献		106
謝辞		109

第1章 緒論

近年、ナノテクノロジーの分野が急速に発展している。その要因として、半導体や磁気記録媒体、医療機器、小型燃料電池など様々な分野で製品の小型化、微細化が進んでいることが考えられる⁽¹⁾。小型化に伴う材料表面の凹凸が製品に影響を与えることは明白である。材料表面の超平滑化にはアルカリ性の溶液を用いて加工する化学研磨が有効であるが、溶液中のイオンの調整や溶存気体の調整に難がある⁽²⁾。そこで、加工速度が速い塑性加工を用いて超平滑面を作成することが出来れば、生産性を向上させる事ができる。

これまで金属表面における平滑化に関する研究は、中村ら⁽³⁾の塑性加工における表面平滑化条件に関する研究、池ら⁽⁴⁾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、H.B. Xieら⁽⁵⁾の鋼を冷間圧延するときの板厚減少率などの表面粗さへの影響に関する研究、H.J. Liらのアルミニウムを単軸圧縮するときの潤滑剤の有無が表面粗さに及ぼす影響を調べた研究⁽⁶⁾と単軸圧縮加工における焼鈍したアルミニウム合金の表面平滑化の微細構造での解析に関する研究⁽⁷⁾と冷間単軸圧縮加工における表面平滑化の摩擦の影響に関する研究⁽⁸⁾、高倉ら⁽⁹⁾の金属材料の塑性変形に伴う粗面化現象に関する研究、M. Naseriら⁽¹⁰⁾のアルミニウムの微細加工による表面形状の変化に関する研究、Xiaoliang Zhangら⁽¹¹⁾のAFMを用いたマイクロ/ナノ表面模様と分子挙動に関する研究、上谷ら⁽¹²⁾のアルミニウムの表面平滑化に関する研究、片岡⁽¹³⁾のドライプレス加工を目的としたDLC膜の工具への密着性向上の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について工具表面に潤滑剤として膜厚 $t=20\text{nm}$ のカーボン蒸着を施して圧

縮加工を行い、アルミニウム焼なまし材と比較し、加工硬化の影響を調べ、さらに $R_a=10\text{nm}$ の工具表面に潤滑剤として膜厚 $t=40\text{nm}$ のカーボン蒸着を施して圧縮試験を行い、カーボン蒸着膜の膜厚の影響を調べた。宮本⁽²³⁾はアルミニウム焼なまし材について $R_a=10\text{nm}$ 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 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。関⁽²⁴⁾は $R_a=5\text{nm}$ と 10nm の工具について DLC コーティングを施した工具を用いたアルミニウム焼なまし材と引き抜き材の圧縮試験と膜厚 $t=40\text{nm}$ のカーボン蒸着膜を施した工具を用いたアルミニウム引抜き材の圧縮試験を行い、これまでの各種条件との比較を行った。

本研究では、表面粗さが $R_a=5\text{nm}$ (Tool-2) と 10nm (Tool-1) に膜厚 $t=100\text{nm}$ のカーボン蒸着を施し、アルミニウム引抜き材の圧縮加工を行い、工具表面粗さ、膜種の違いによる影響について検討した。また、DLC の密着性の違いによる影響について検討するために $R_a=10\text{nm}$ (Tool-1) に密着性の高い DLC コーティングを施し、アルミニウム引抜き材の圧縮試験を行い、これまでの各種条件との比較を行った。実験結果の検討では、カーボン蒸着膜では撮影した写真から、工具に蒸着したカーボンの剥離面積を求めた。また、触針式表面粗さ計を用いて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。さらに、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クロス(リファインテック株式会社製, 直径 200mm)で圧縮表面を研磨して板厚を 0.8mm として試験片とした。研磨方法については脇⁽²⁵⁾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

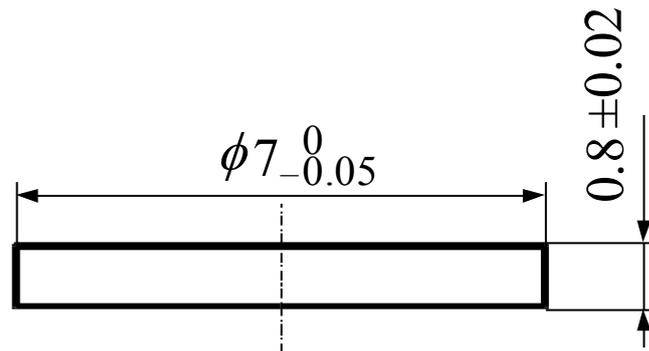
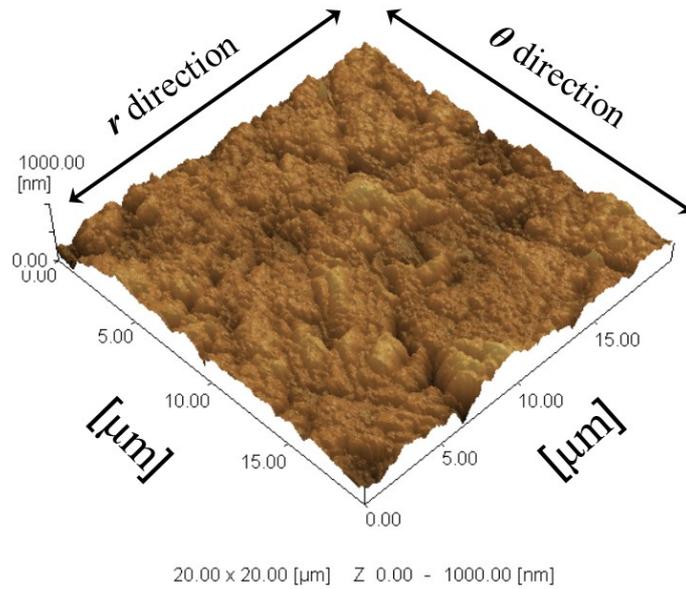
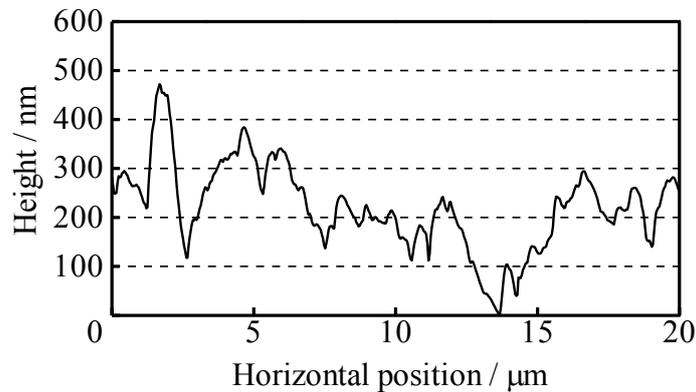


Fig.2.1 試験片の寸法



(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⁽²⁶⁾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 $R_a=0.95\mu\text{m}$ 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．

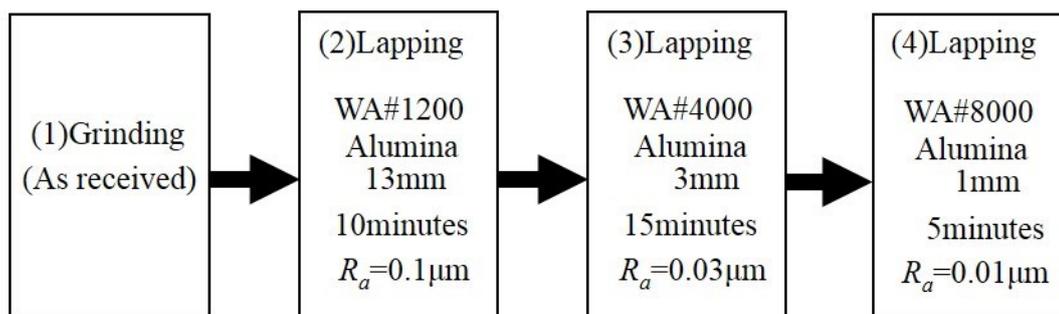


Fig. 2.3 工具の製作手順 (Tool-1)

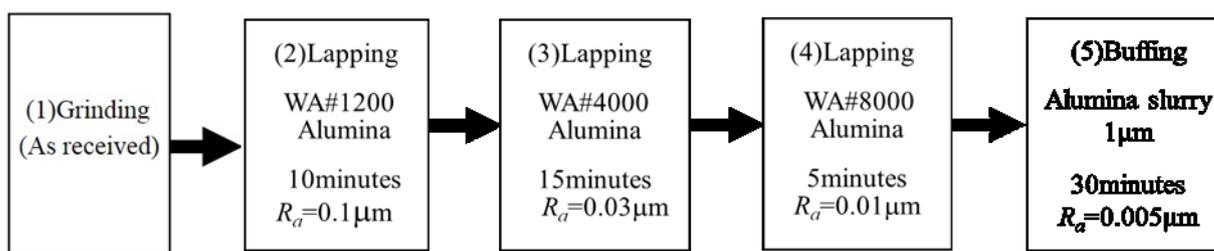


Fig. 2.4 工具の製作手順 (Tool-2)

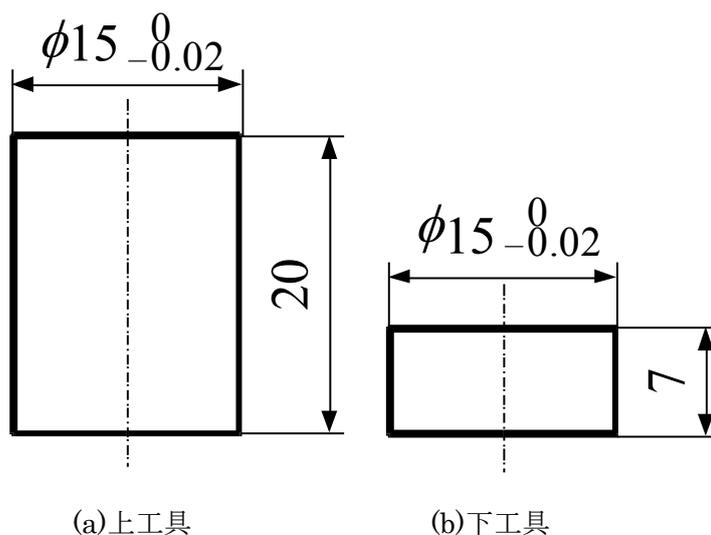


Fig. 2.5 工具の寸法



Fig. 2.6 研磨後の工具表面(Tool-1)

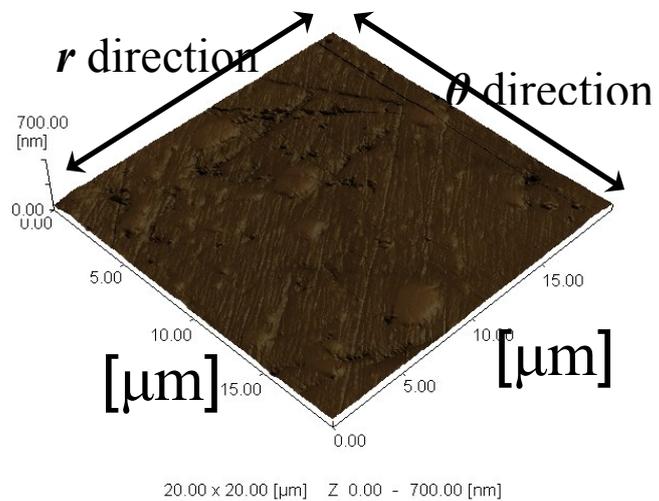


Fig. 2.7 工具表面の AFM 像(Tool-1)

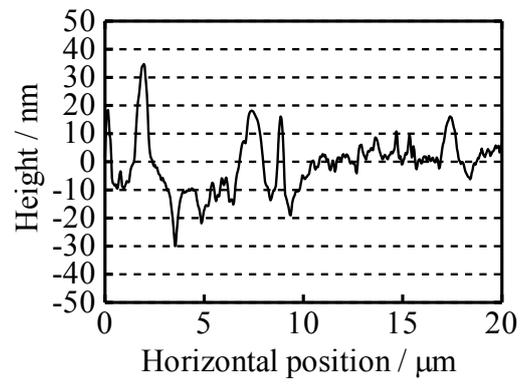


Fig. 2.8 工具表面の断面曲線(Tool-1)

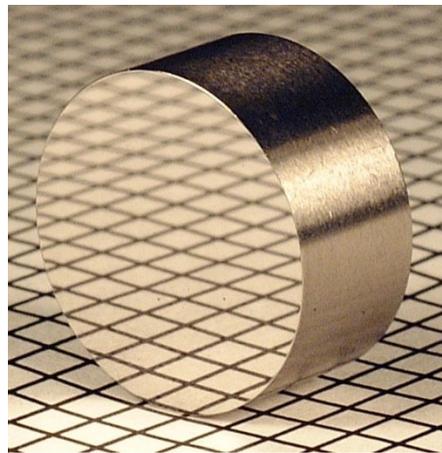


Fig.2.9 研磨後の工具表面(Tool-2)

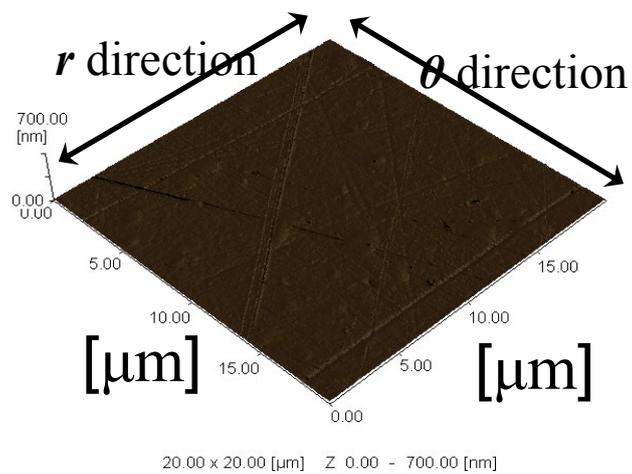


Fig. 2.10 工具表面の AFM 像(Tool-2)

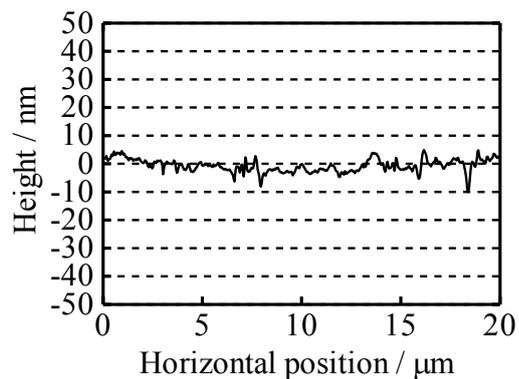


Fig. 2.11 工具表面の断面曲線(Tool-2)

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 $\phi 5 \times 100 \text{mm}$)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²⁷⁾に基づきカーボン蒸着を行った.

本研究ではカーボン蒸着膜の膜厚を $t=100 \text{nm}(t \cdot 4)$ とするために, Fig.2.13 に示すように針状カーボンの先端直径を $1.4 \pm 0.2 \text{mm}$, 末端直径を $2.6 \pm 0.2 \text{mm}$ に変更し, 蒸着の際流す電流を 40A で 20~30 秒程度とした. なお, 膜厚が $t=90 \text{nm} \sim 120 \text{nm}$ に蒸着した工具を t-4 とする.



Fig. 2.12 真空蒸着装置の外観

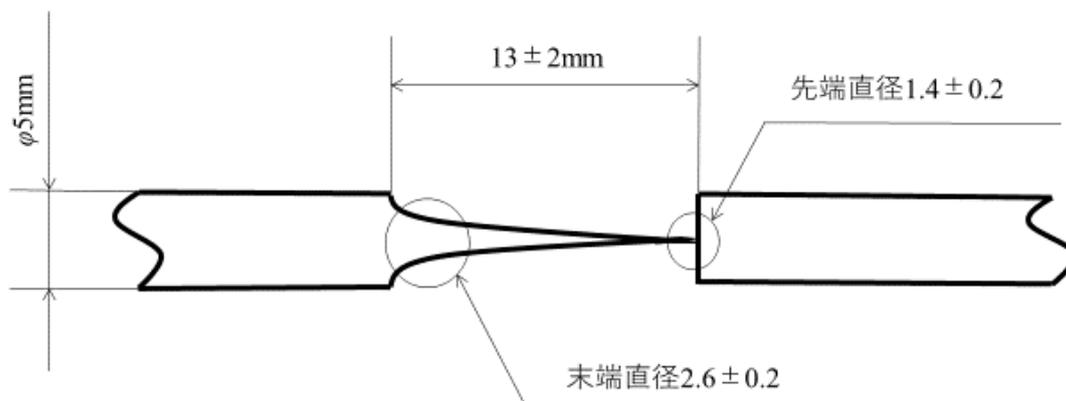


Fig.2.13 針状カーボンの外形

2.2.3 HA-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。この DLC を DLC-A と呼称する。

Table 2.2 HA-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°C	150~ 200°C	0.15~0.2	1.0 (ラップ後 0.2)

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

2.2.4 Me-DLC コーティング

これまで使用してきた DLC-A (HA-DLC) は高荷重下で DLC 膜の表面状態の悪化が確認されたので、別の DLC コーティングでも実験を行った。DLC コーティングは、東研サーモテック株式会社に依頼した。今回用いた同社の Me-DLC(Metal included DLC)の仕様を Table 2.3 に示す。この DLC を DLC-B と呼称する。Me-DLC は基材と DLC 膜の間にタンゲステンを挟む事で、密着性を向上させた DLC である。

Table 2.3 Me-DLC コーティングの仕様

DLC 構造	硬度 (Hv)	膜厚 (nm)	酸化温度	処理温度	摩擦係数	面粗度 R_z (μm)
a-C:H	>1200	2000~ 3000	300~350°C	180°C	0.15	工具の表面粗さと 同程度

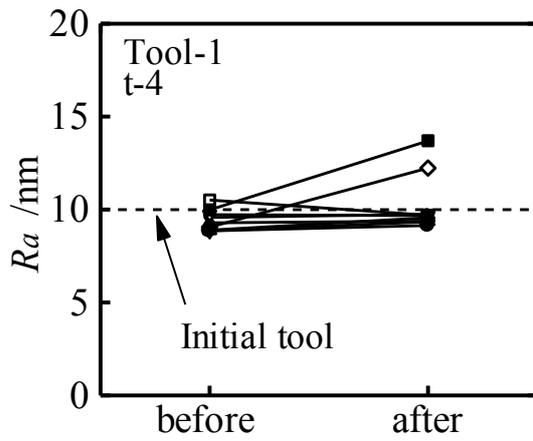
色調	特徴	適用基材	用途
黒色	W を含有し、相手攻撃性が低く無潤滑での摩擦低減に効果	超硬一般鋼	駆動系 自動車用空調部品 家電部品

2.2.5 カーボン蒸着による表面状態の影響

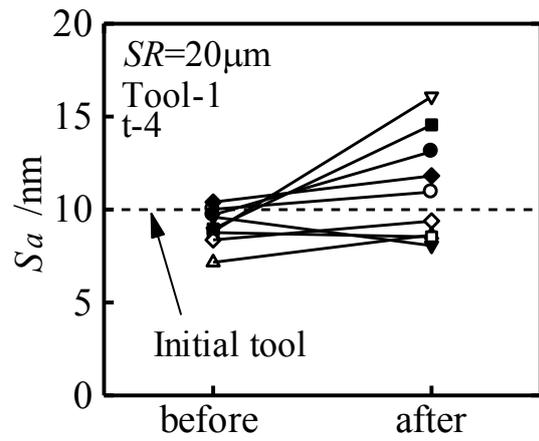
工具にカーボン蒸着を行った際の蒸着による工具表面状態の影響を調べるため、蒸着前後の各種データの比較を行った。

Fig.2.14 にカーボン蒸着膜の膜厚を $t=100\text{nm}(t-4)$ とした工具 Tool-1 の蒸着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。 R_a 、 S_a とともに蒸着後で大きくなる場合がある。零点集合次元 D_z 、パワースペクトル次元 D_{PS} は蒸着後に僅かに大きくなる傾向がある。

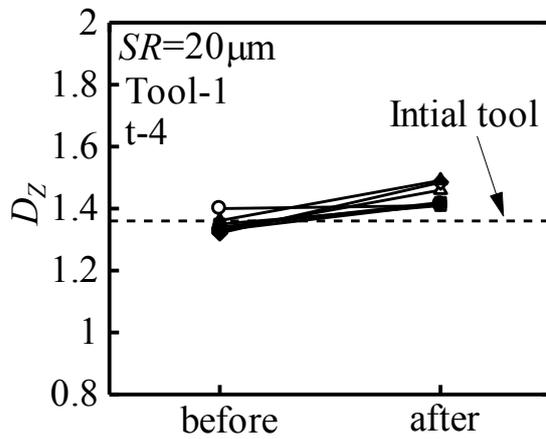
Fig.2.15 にカーボン蒸着膜の膜厚を $t=100\text{nm}(t-4)$ とした工具 Tool-2 の蒸着前後の算術平均粗さ R_a 、算術平均面粗さ S_a 、零点集合次元 D_z およびパワースペクトル次元 D_{PS} を示す。 R_a では蒸着後で僅かに大きくなる場合あり、 S_a でも蒸着後で僅かに大きくなる様子が見られる。零点集合次元 D_z 、パワースペクトル次元 D_{PS} はばらつきがあり、初期工具よりも小さい値になっている。



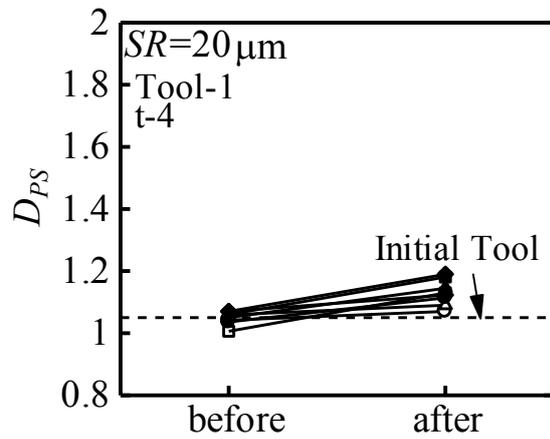
(a)カーボン蒸着前後の
算術平均粗さ R_a



(b)カーボン蒸着前後の
算術平均面粗さ S_a



(c)カーボン蒸着前後の
零点集合次元 D_z



(d)カーボン蒸着前後の
パワースペクトル次元 D_{PS}

Fig.2.14 カーボン蒸着工具(Tool-1, t-4)

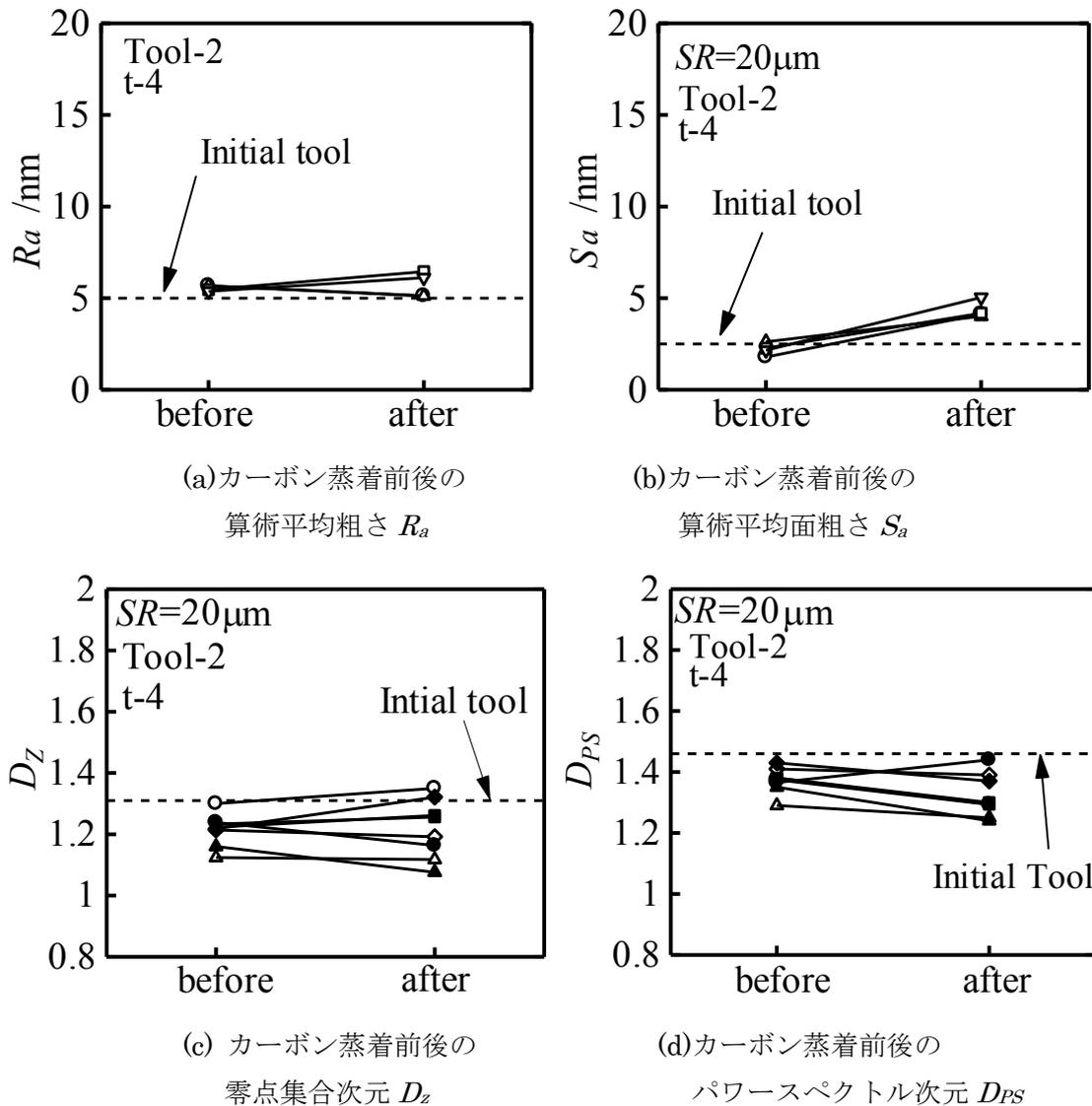


Fig.2.15 カarbon蒸着工具(Tool-2, t-4)

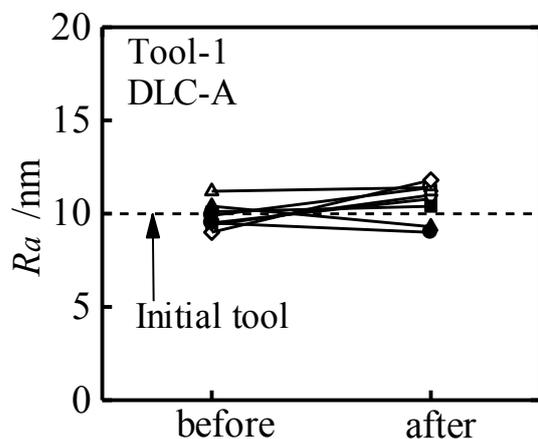
2.2.6 DLC コーティングによる表面状態の影響

工具に DLC コーティングを行った際の蒸着による工具表面状態の影響を調べるため、蒸着前後の各種データの比較を行った。

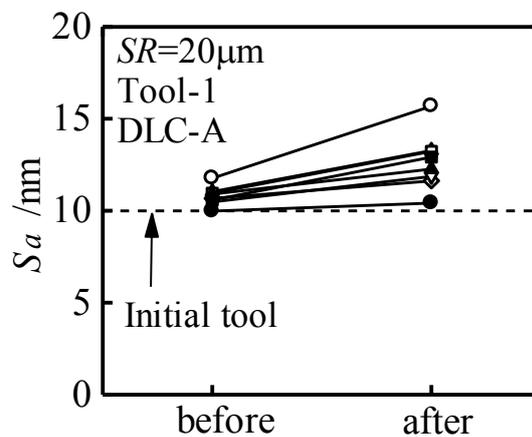
Fig.2.16 に DLC-A コーティング工具 Tool-1 の算術平均粗さ R_a 、算術平均面粗さ S_a 、零点集合次元 D_z およびパワースペクトル次元 D_{PS} を示す⁽²⁸⁾。コーティング前後で工具表面粗さ R_a には大きな違いは見られないが、算術平均面粗さ S_a ではコーティング後にわずかに粗くなっている様子が見られる。零点集合次元 D_z 、パワースペクトル次元 D_{PS} については大きな違いは見られない。

Fig.2.17 に DLC-B 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 、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

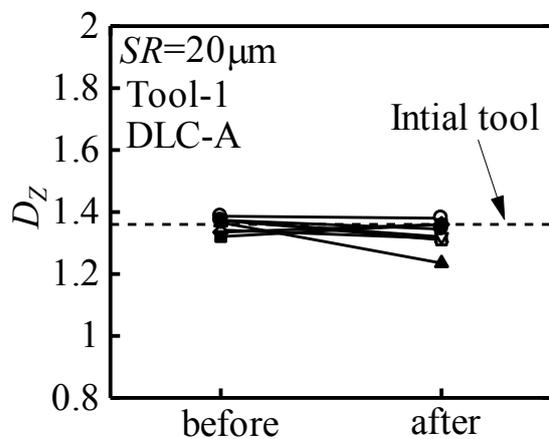
ング前後で工具表面粗さ R_a は大きな違いは見られないが、算術平均面粗さ S_a はコーティング後になんかなり大きくなっている。零点集合次元 D_z 、パワースペクトル次元 D_{PS} はコーティング前と比べ、コーティング後にわずかに大きくなる傾向が見られる。



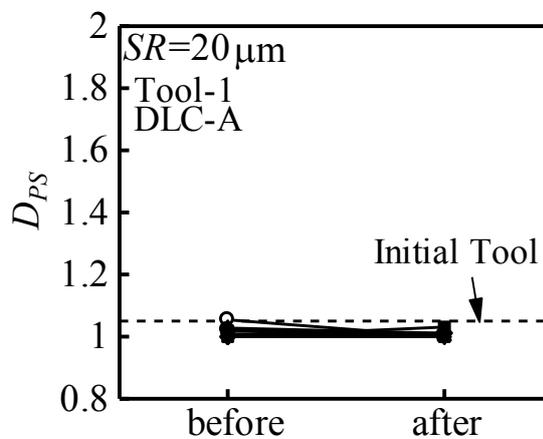
(a) DLC コーティング前後の算術平均粗さ R_a



(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.2.16 DLC-A コーティング工具 (Tool-1, DLC-A)

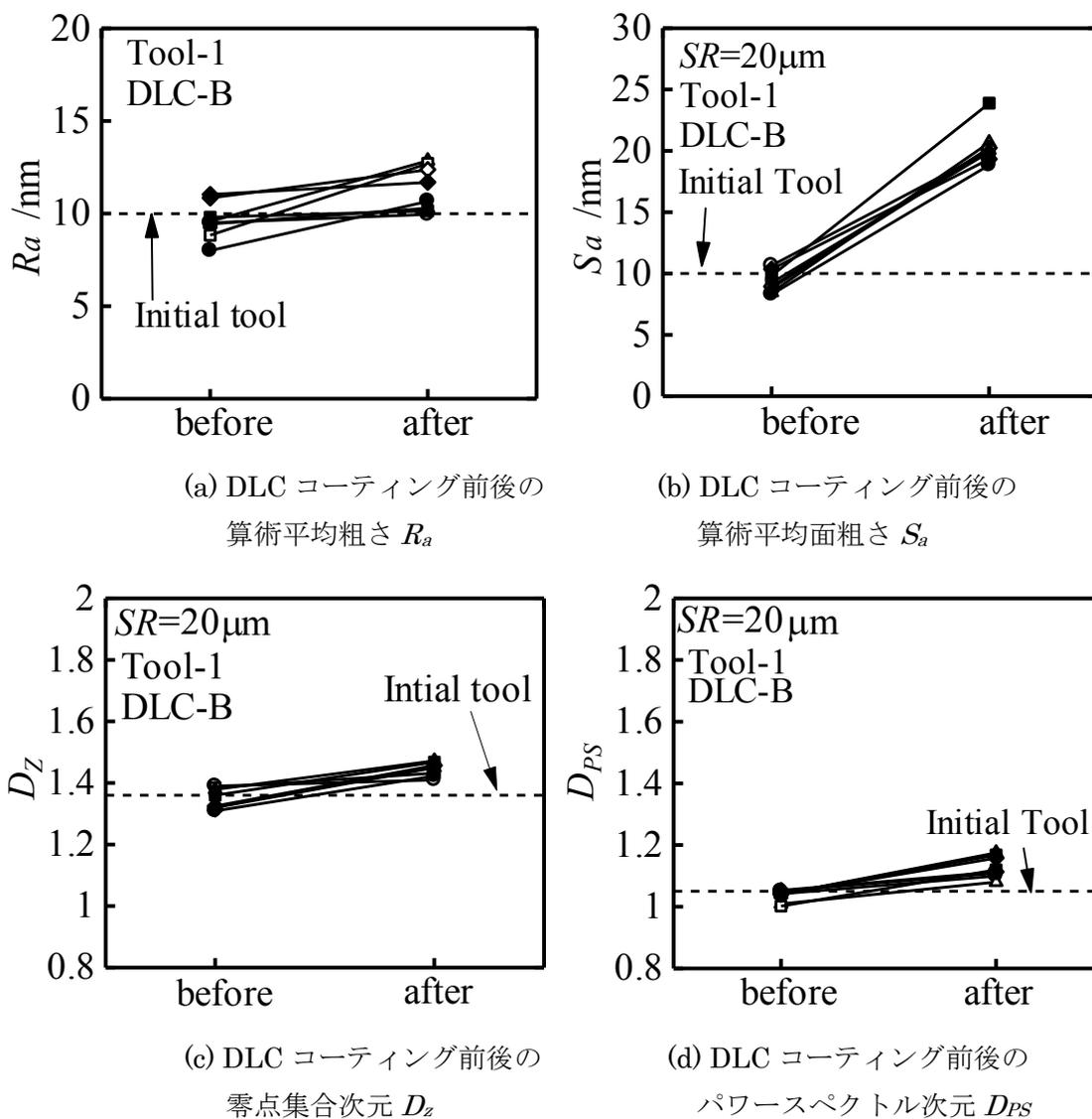


Fig.2.17 DLC-B コーティング工具 (Tool-1, DLC-B)

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⁽²⁹⁾に基づき実験を行った。

2.3.1 圧縮試験装置

圧縮試験における加圧装置には、万能試験機(島津製作所製, REH-50 型)を使用した。Fig. 2.18 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. 2.19

に示すようにダイセット(双葉電子工業製)に設置した.



Fig. 2.18 万能試験機(島津製作所製, REH-50 型)

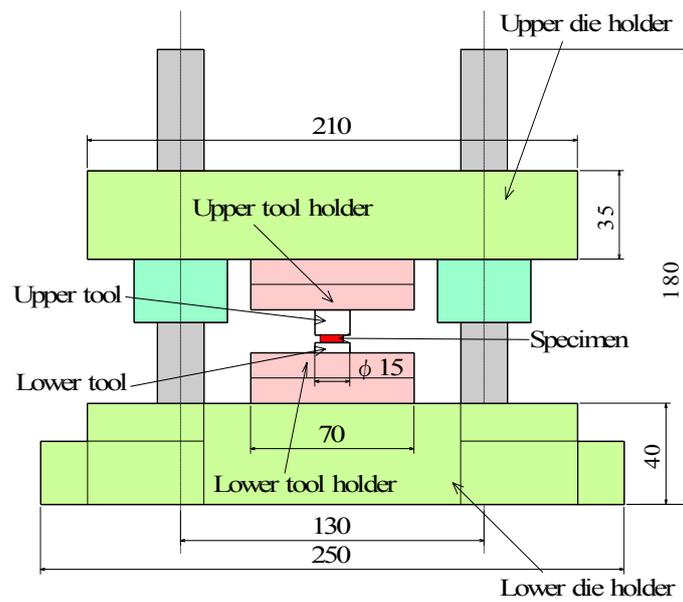


Fig. 2.19 圧縮工具とダイセットの概略図

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

245 [kN]レンジの場合：荷重値[N]=2505.26×出力電圧[mV]

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. 2.20 に示す。触針式表面粗さ計は Fig. 2.21 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⁽³⁰⁾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. 2.20 触針式表面粗さ計(Surftest SJ-400)の外観

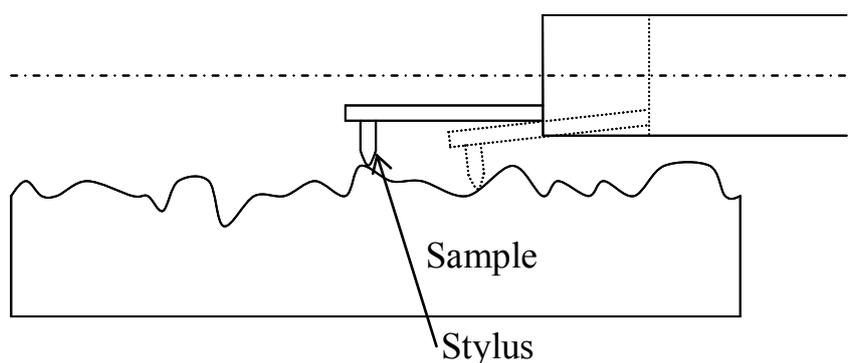


Fig. 2.21 触針式表面粗さ計の原理図

2.5 原子間力顕微鏡(AFM)による観察方法⁽³¹⁾

SPM(Scanning Probe Microscope)装置とその周辺システムの外観写真を Fig. 2.22 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⁽³²⁾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. 2.23 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. 2.23 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。

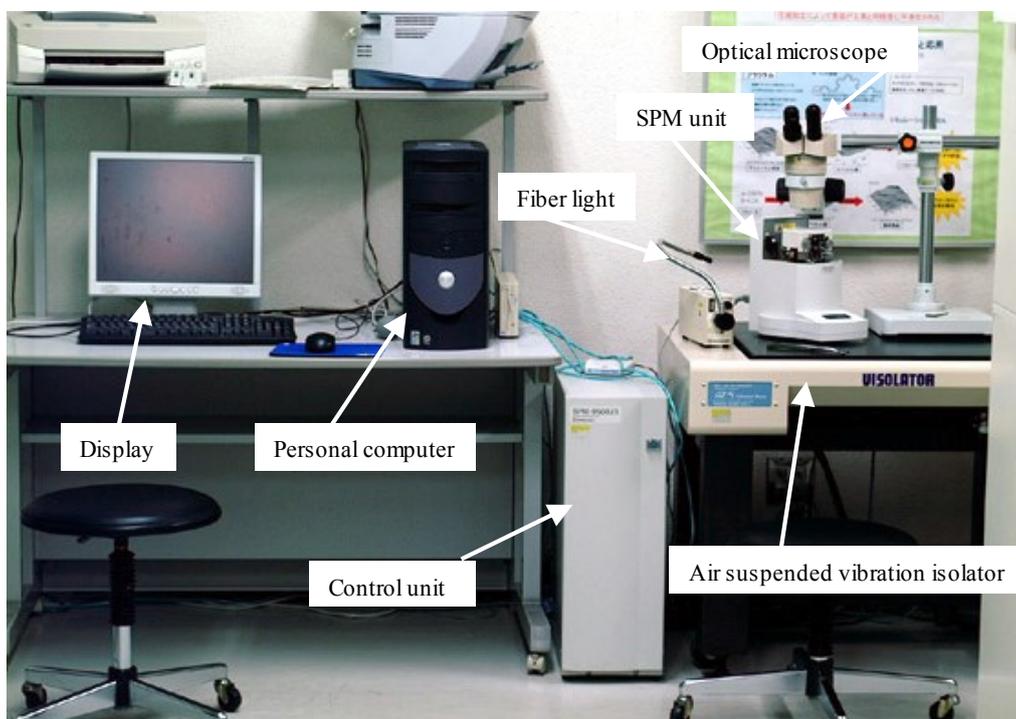


Fig. 2.22 SPM 装置および周辺装置の外観

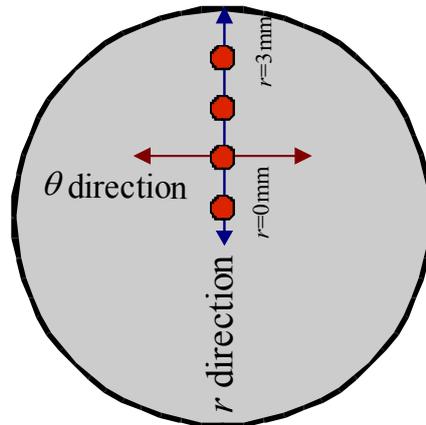


Fig. 2.23 圧縮後試験片の AFM 観察を行う場所

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⁽³³⁾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 DLC 工具表面の撮影方法

工具表面の外観について検討するために、実験後の工具表面の写真を撮影した。撮影方法については脇⁽³⁴⁾に基づき行った。圧縮後工具表面の外観写真を Fig. 2.24 に示す。

- (1) デジタルカメラ(FUJIFILM 製, FinPixS1Pro)とマイクロレンズ(Nikon 製, Micro-NIKKOR)を用意し, Fig. 2.25 のようにコピースタンドに設置する。ライトは電球の先端がコピースタンドの 23cm のメモリに合うように設置する。カメラは Fig. 2.25 のコピースタンドに固定し, スタンドの下端を 27cm に合わせて固定する。
- (2) 工具を厚さ 3mm のアクリル板で斜めにした状態で黒色のシートの上に載せ撮影する。鮮明な画像データを得るために, 工具には出来る限り強く光を当て, さらに白い紙で光を反射させる。その様子を Fig. 2.26 に示す。

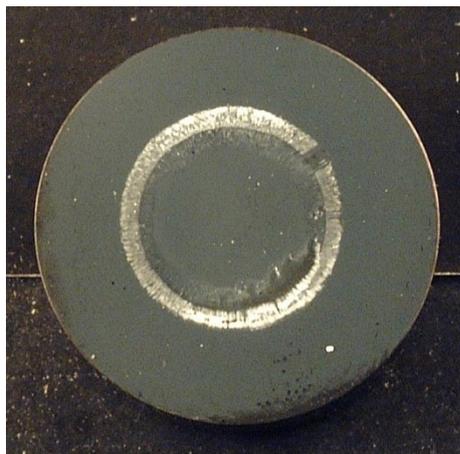


Fig. 2.24 圧縮後工具表面のデジタルカメラ像の一例
(DLC-B, Tool-1, A1050-H, $e_c=40\%$)



Fig. 2.25 デジタルカメラをコピースタンドに設置したときの概観

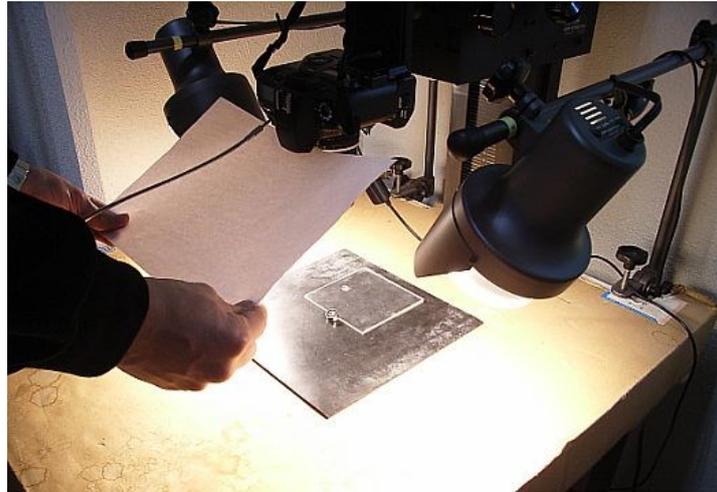


Fig. 2.26 撮影時の様子

2.8 有限要素法(FEM)解析

2.8.1 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. 2.27 に FEM 解析モデルと境界条件, Table 2.4 に FEM 解析条件を示す。

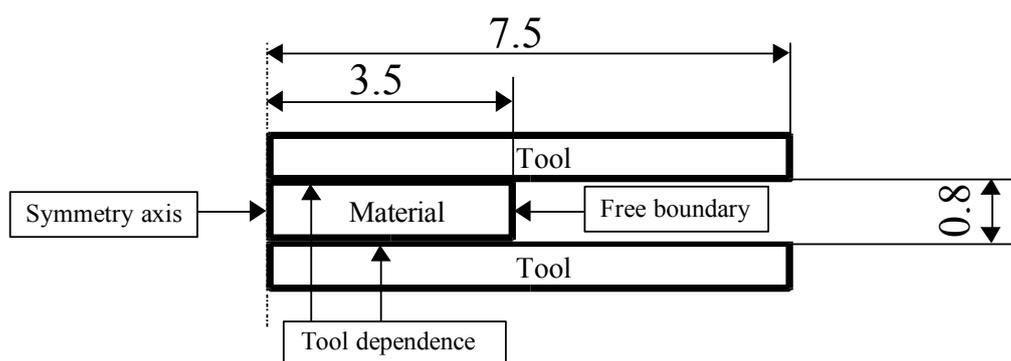


Fig. 2.27 FEM 解析モデルと境界条件

Table 2.4 FEM 解析条件

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

2.8.2 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. 2.28 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. 2.29 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。

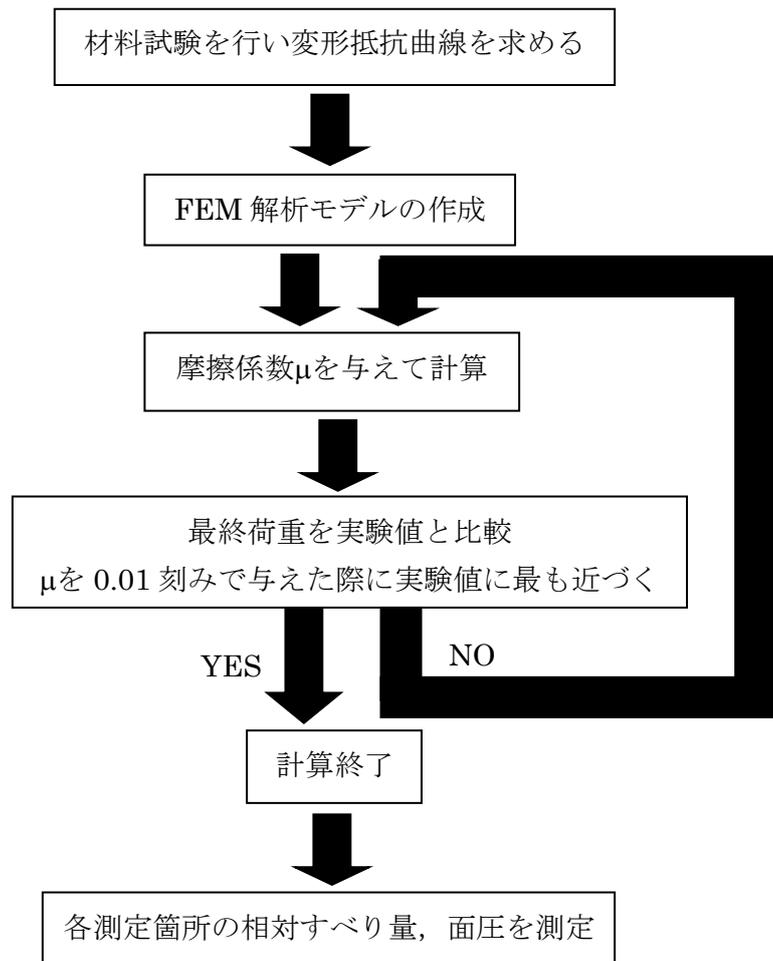
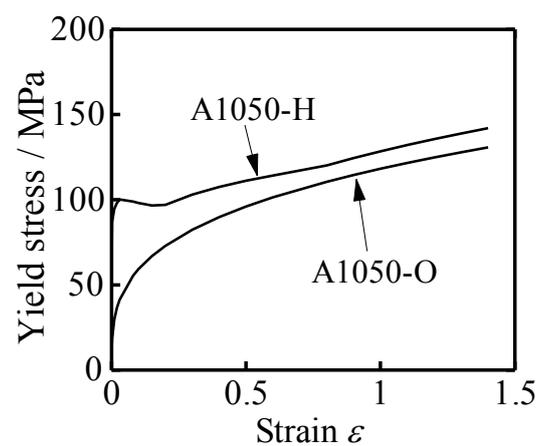
Fig. 2.28 摩擦係数 μ の決定方法

Fig. 2.29 アルミニウム試験片の変形抵抗曲線

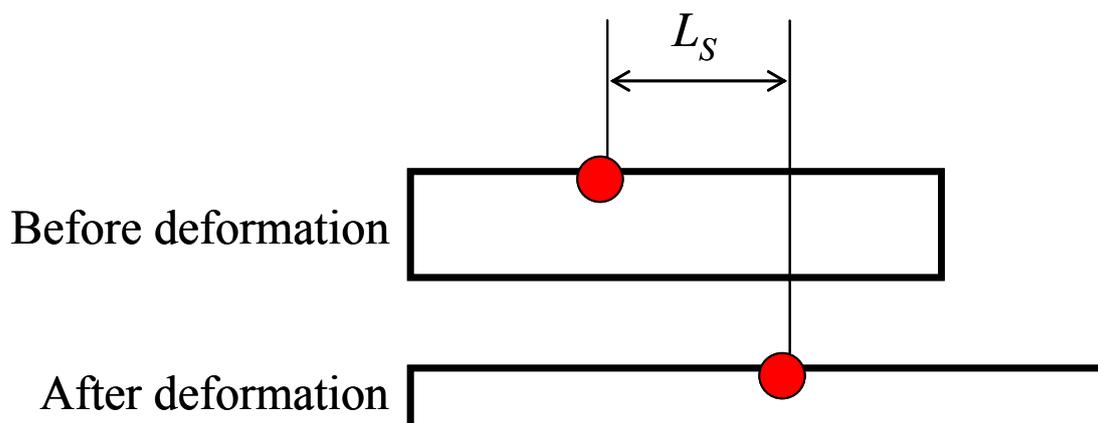


Fig. 2.30 相対すべり量 L_S の定義

2.8.3 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. 2.30 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。本研究ではアルミニウム引抜き材について、これまでの膜厚よりも厚い $t=100\text{nm}$ (t-4) の工具を用い、膜厚の影響を調べた。さらに、これまでに行ってきたものとは種類の異なる DLC-B を用い、比較検討を行った。Table 3.2 に本研究で行った圧縮試験条件を示す。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、膜厚、膜種の影響について検討した。

Table 3.1 これまでに行った圧縮試験条件

Material of specimen	Coating material of tool	Roughness of tool R_a / nm	Coating thickness of tool / nm
A1050-O	Carbon	10(Tool-1)	20(t-2)
			40(t-3)
		5(Tool-2)	0(t-0)
			10(t-1)
			20(t-2)
			40(t-3)
	DLC-A	10(Tool-1)	100
		5(Tool-2)	
A1050-H	Carbon	10(Tool-1)	20(t-2)
			40(t-3)
		5(Tool-2)	20(t-2)
			40(t-3)
	DLC-A	10(Tool-1)	100
		5(Tool-2)	

Table 3.2 本研究で行った圧縮試験条件

Material of specimen	Coating material of tool	Roughness of tool R_a / nm	Coating thickness of tool / nm
A1050-H	Carbon	10(Tool-1)	100(t-4)
		5(Tool-2)	100(t-4)
	DLC-B	10 (Tool-1)	2000-3000

3.1 Tool-1($R_a=10\text{nm}$), t-4(膜厚 $t=100\text{nm}$), A1050-H における実験結果

3.1.1 圧縮率と試験片表面粗さの関係

Fig.3.1 に圧縮前と平滑化が進んでいる圧縮率 $e_c=35\%$ 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。高圧縮率では写真のようにカーボン蒸着膜が剥離した様子が見られた。

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 $e_c=35\%$ 以下では剥離面積率のばらつきが大きく、高圧縮率では剥離面積率が大きくなる。

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。加工硬化により初期の変更抵抗の大きい H 材を用いているため、低圧縮率でも初期試験片の算術平均粗さ($R_a=80\text{nm}$)に比べ大きく平滑化されていることがわかる。また、圧縮率 $e_c=35\%$ 以下では剥離面積率にばらつきがあることから、算術平均粗さ R_a にも同様のばらつきが見られる。高圧縮率では剥離が大きいため、工具と試験片が接触し算術平均粗さ R_a は大きくなると考えられる。

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 Tool-1, t-4 の平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。若干ばらつきはあるが、圧縮率が高くなるほど平均面圧が大きくなる傾向が見られる。

Fig.3.6 に Tool-1, t-4 の荷重 P とレコーダー出力変位 S_r の関係を示す。実験ごとに若干ばらつきが見られる。

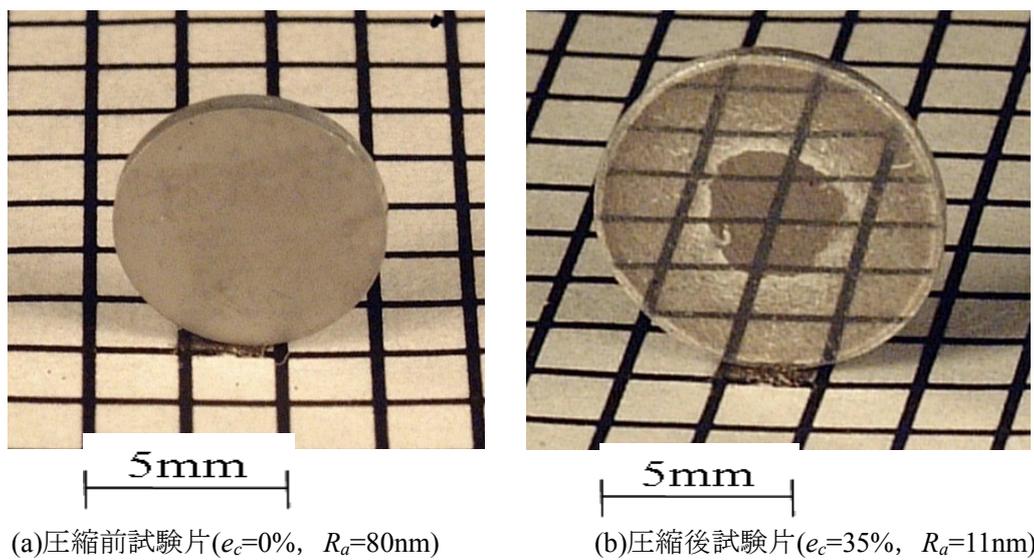


Fig.3.1 圧縮前後の試験片の外観(Tool-1, t-4, A1050-H)



Fig.3.2 圧縮後工具表面(Tool-1, t-4, A1050-H, $e_c=52\%$, $\gamma=82\%$)

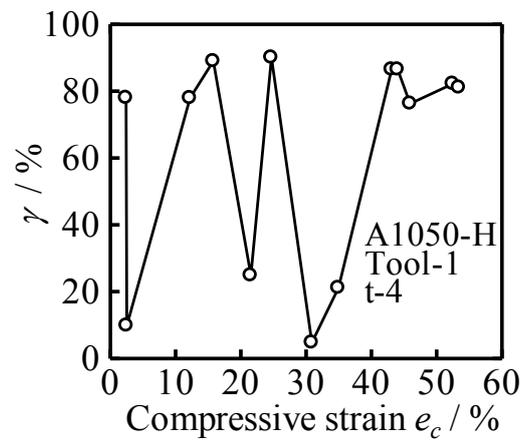


Fig.3.3 剥離面積率 γ と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, t-4, A1050-H)

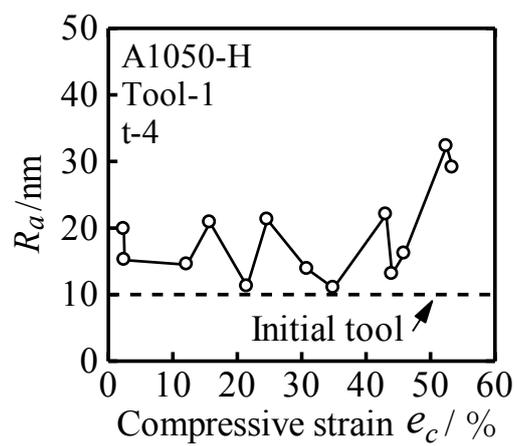


Fig.3.4 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, t-4, A1050-H)

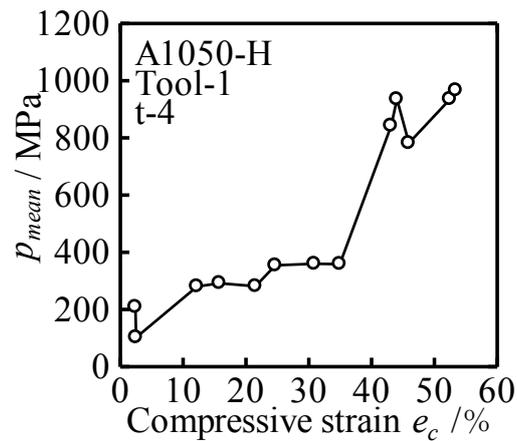


Fig.3.5 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係(Tool-1, t-4, A1050-H)

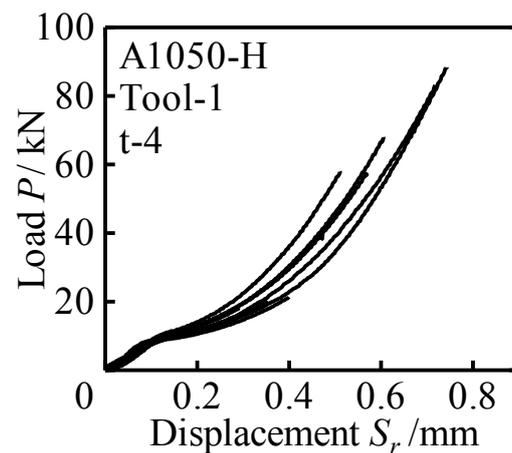


Fig.3.6 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係(Tool-1, t-4, A1050-H)

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 $e_c=35\%$ 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。剥離面積率が小さい圧縮率 20%、35%付近では、算術平均面粗さ S_a も小さくなり中心部よりも外周部で平滑化される傾向がある。剥離面積率が大きい場合、算術平均面粗さ S_a も大きくなり、外周部で試験片表面が粗くなる傾向がある。特に高圧縮率においてその違いは顕著になる。

Fig.3.10 に圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。低圧縮率では中心部と外周部では同程度の平滑度であり、圧縮率 $e_c=22\% \sim 35\%$ では工具表面のカーボン膜の剥

離が少ないことから外周部で平滑化が進む傾向にある。高圧縮率では工具表面のカーボン膜の剥離が大きいことから外周部の S_a は大きくなる様子が見られる。

Fig.3.11 に測定箇所 $r=0\text{mm}$, 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。 $r=0\text{mm}$ 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、圧縮率 16%, 46%において θ 方向よりも r 方向の方が R_{ae} がわずかに小さくなり、測定方向による違いがある場合がある。

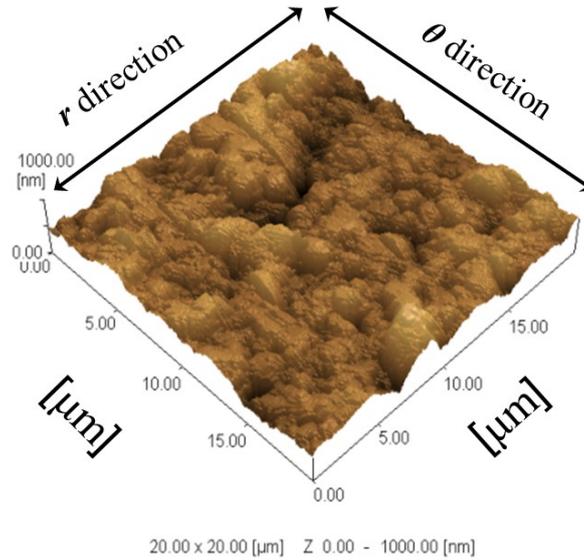
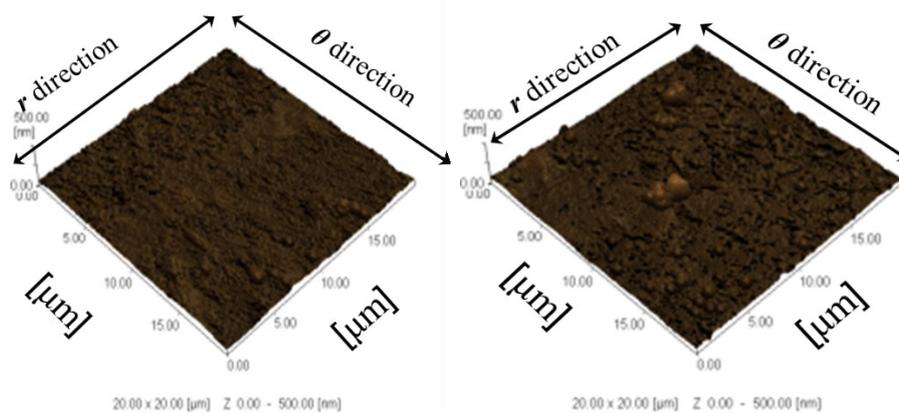


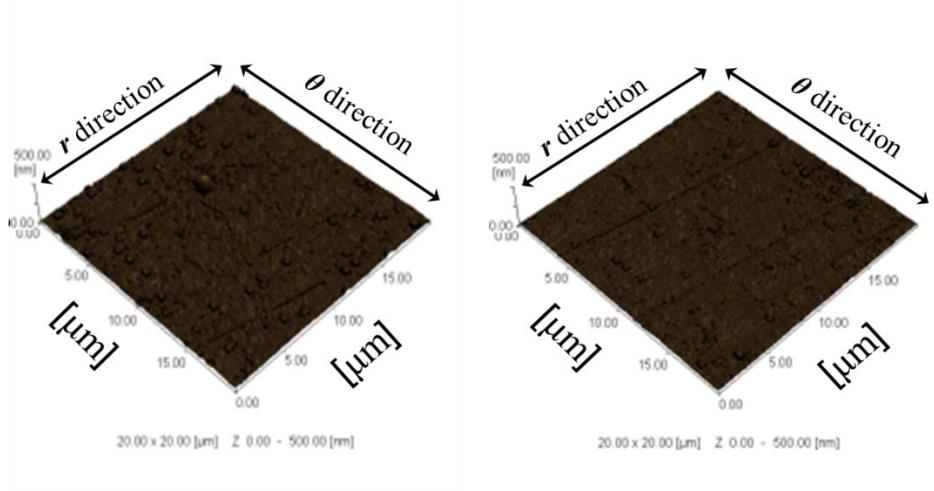
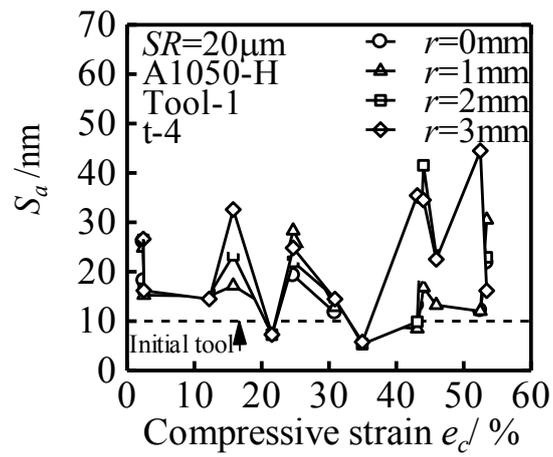
Fig.3.7 初期試験片表面の AFM 像($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)



(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($e_c=35\%$, $SR=20\mu\text{m}$, Tool-1, t-4, 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($e_c=35\%$, $SR=20\mu\text{m}$, Tool-1, t-4, A1050-H)Fig.3.9 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, t-4, A1050-H)

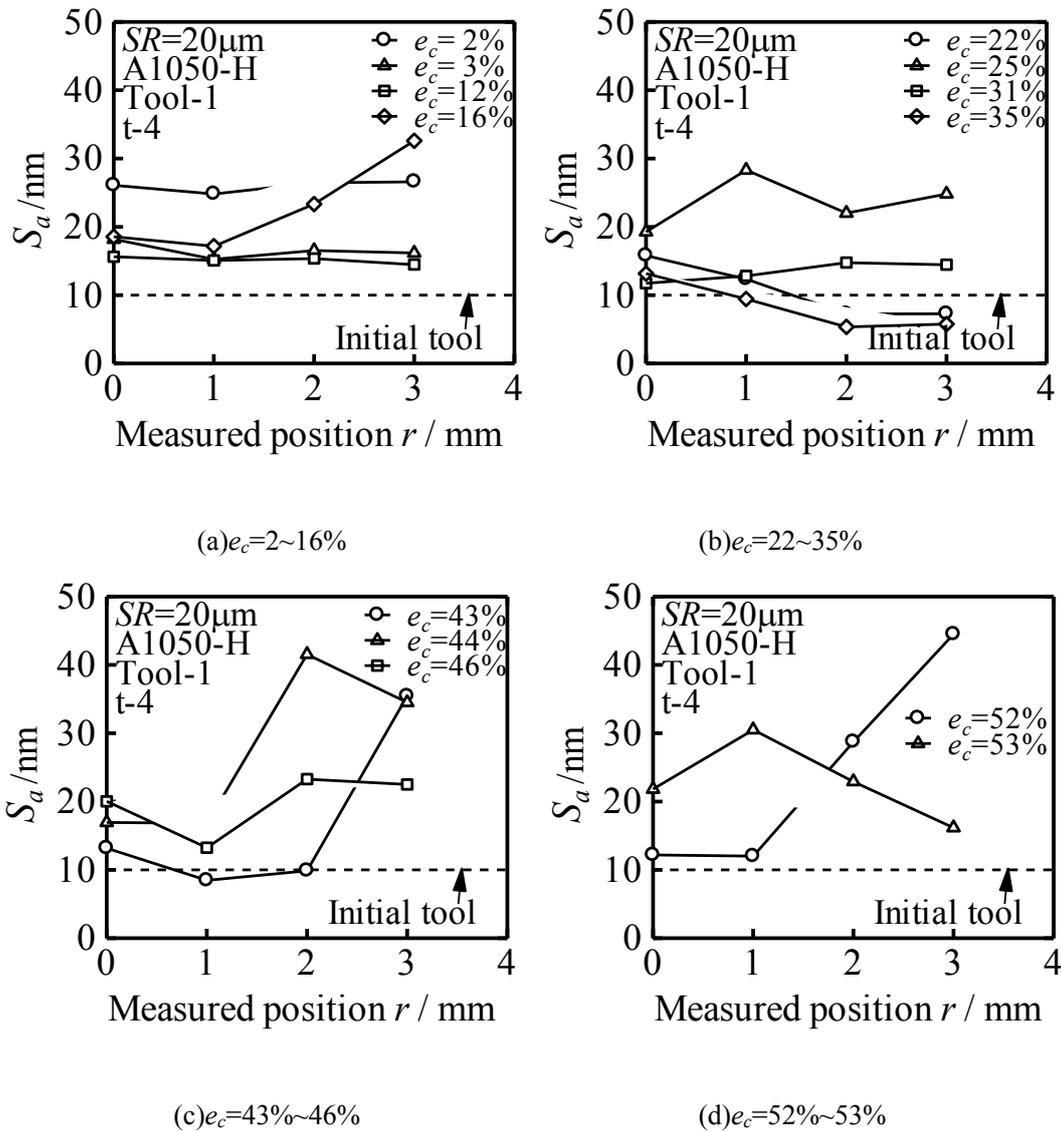
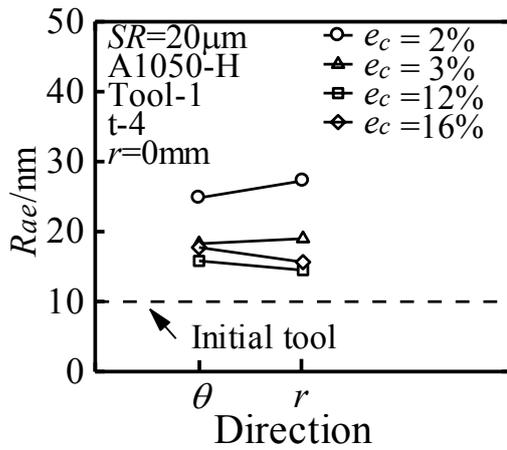
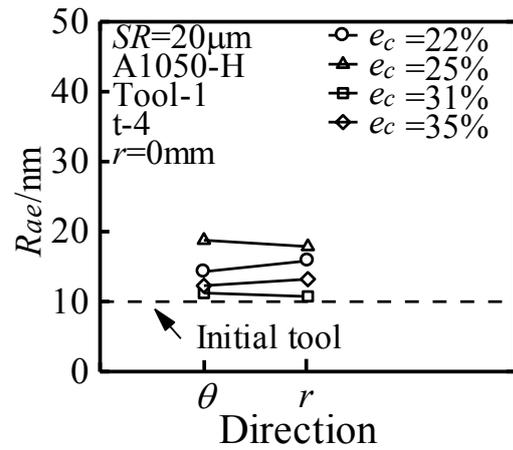
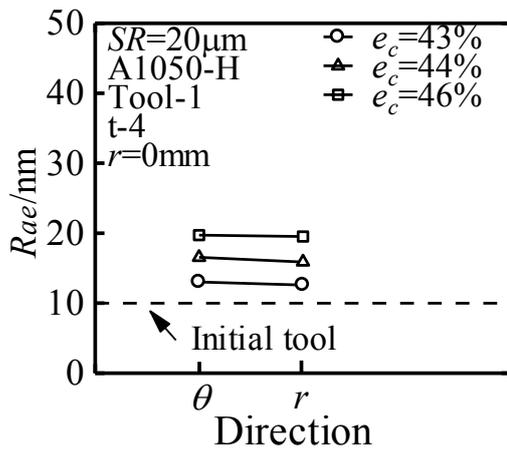
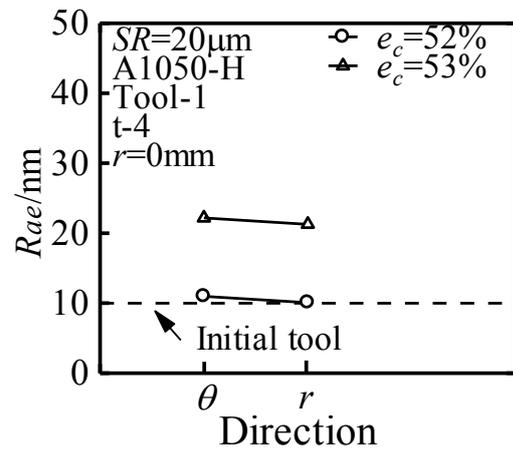


Fig.3.10 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (Tool-1, t-4, A1050-H)

(a) $e_c=2\sim 16\%$ (b) $e_c=22\sim 35\%$ (c) $e_c=43\sim 46\%$ (d) $e_c=52\sim 53\%$ Fig.3.11 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係($r=0\text{mm}$, Tool-1, t-4, A1050-H)

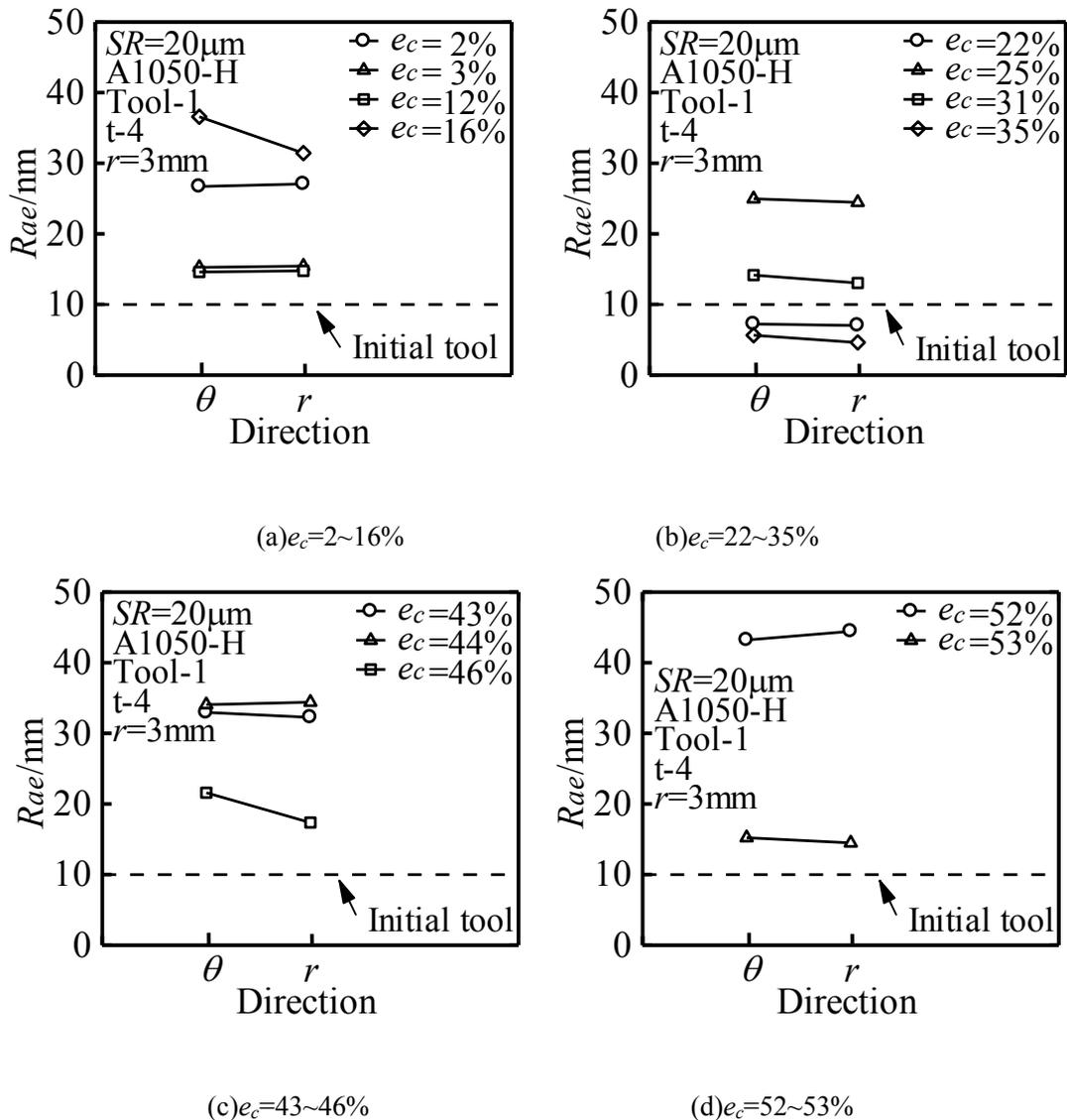


Fig.3.12 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係($r=3\text{mm}$, Tool-1, t-4, A1050-H)

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. 圧縮率 $e_c=2\%$, 3% , 52% , 53% については FEM において本ソフトで設定可能な最大の摩擦係数 $\mu=0.577$ にして計算した最終荷重よりも, 実験値の方が

大きくなったため、それ以外の結果のみ考察を行う。最終荷重が一致したものについては、実験と FEM は加工初期を除きおおむね一致している。

Fig.3.14 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 にばらつきがあることから、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 Tool-1, t-4 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。どの圧縮率でもすべり量 L_S が小さい中心部は面圧が大きく、すべり量 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。工具表面の剥離面積率が小さい圧縮率 22%, 31%, 35% では、すべり量が大きいと S_a は小さくなる傾向が見られる。剥離面積率が大きい場合、特に圧縮率 16%, 25%, 43%, 44% では、すべり量が大きいと S_a は大きくなる傾向がある。これはすべり量 L_S の大きい外周部では、カーボン膜の剥離が少ないと材料流動によるしごき効果が得られ算術平均面粗さ S_a は小さくなり、剥離が大きいと金属同士が直接接触し算術平均面粗さ S_a は大きくなるためと考えられる。

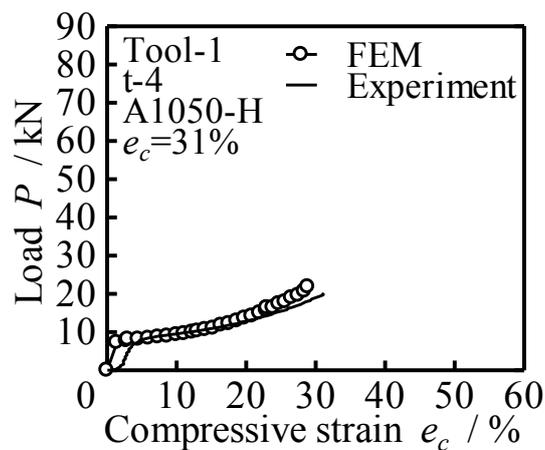


Fig.3.13 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, t-4, A1050-H)

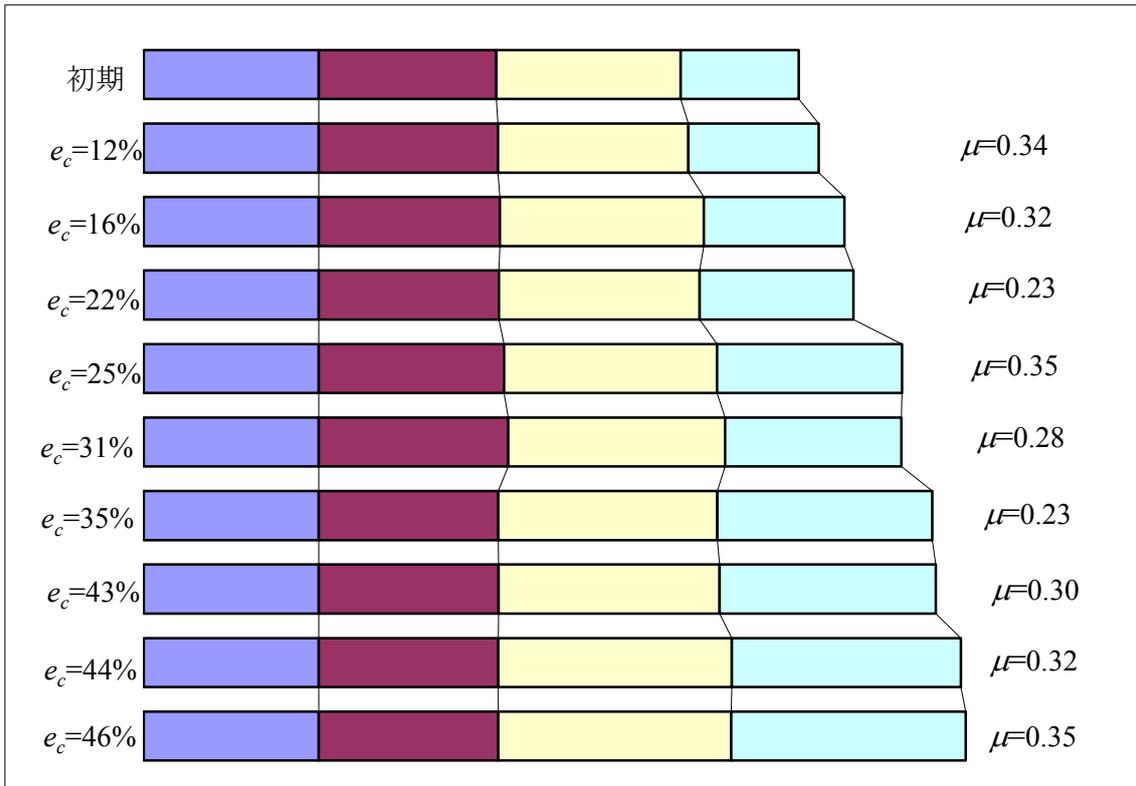


Fig.3.14 FEM 解析による変形の様子(Tool-1, t-4, A1050-H)

($e_c=12\% : \mu=0.34$, $e_c=16\% : \mu=0.32$, $e_c=22\% : \mu=0.23$, $e_c=25\% : \mu=0.35$, $e_c=31\% : \mu=0.28$,
 $e_c=35\% : \mu=0.23$, $e_c=43\% : \mu=0.30$, $e_c=44\% : \mu=0.32$, $e_c=46\% : \mu=0.35$)

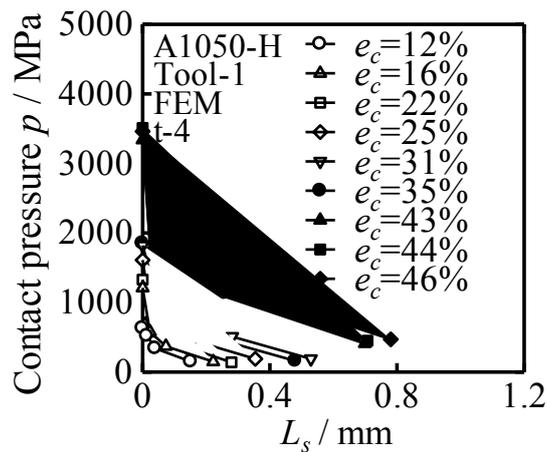
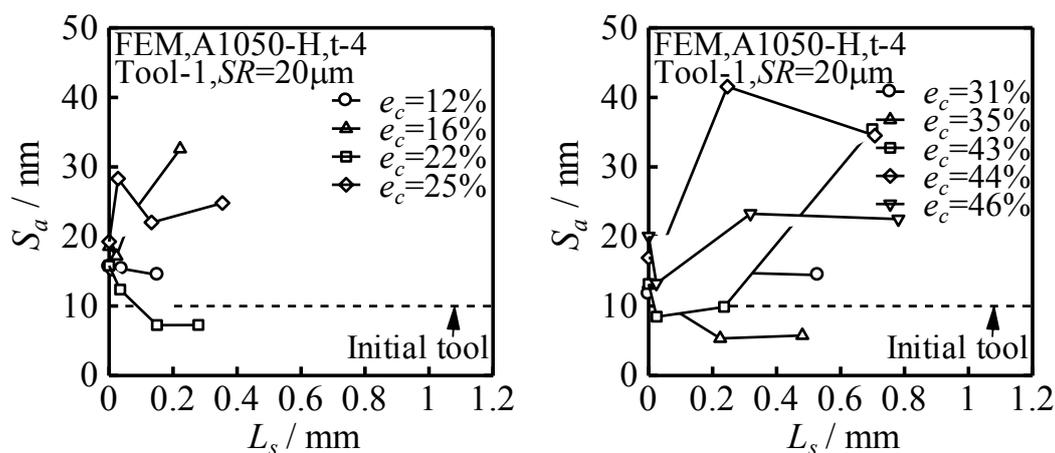


Fig.3.15 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係(Tool-1, t-4, A1050-H)

(a) $e_c=12\sim 25\%$ (b) $e_c=31\sim 46\%$ Fig.3.16 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係(Tool-1, t-4, A1050-H)

3.2 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), t-4($t=100\text{nm}$), 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 $e_c=44\%$ 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.3.1 と比較すると、Tool-1 よりも Tool-2 の方が鏡面化されている。

Fig.3.18 に圧縮後工具表面写真の例を示す。高压縮率の外周部で僅かに工具表面状態が悪化した様子が観察された。Fig.3.2 と比較すると、Tool-1 よりも Tool-2 の方が明らかに工具表面のカーボン蒸着膜の剥離が少ない。

Fig.3.19 に剥離面積率 γ と圧縮率 e_c の関係を示す。どの圧縮率においても工具表面のカーボン膜の剥離は少ないことがわかる。Fig.3.3 と比較すると、Tool-1 より剥離が少ない傾向がある。

Fig.3.20 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。加工硬化により初期の変更抵抗の大きい H 材を用いているため、低圧縮率でも初期試験片の算術平均粗さ($R_a=80\text{nm}$)に比べ大きく平滑化される。圧縮率 e_c が大きくなると平滑化が進み初期工具と同程度に平滑化される。Fig.3.4 と比較すると、Tool-1 ではばらつきが大きく平滑化されない場合が多いのに対し、Tool-2 では明らかに平滑化されている。

Fig.3.21 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。Fig.3.5 と比較すると、高压縮率で Tool-1 よりも Tool-2 の方が平均面圧が低いことがわかる。これは Tool-2 の方がカーボン蒸着膜の剥離が少なく潤滑状態が良いためだと考えられる。

Fig.3.22 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.3.6 と比較すると、各実験に

おけるばらつきはほとんどないことがわかる。

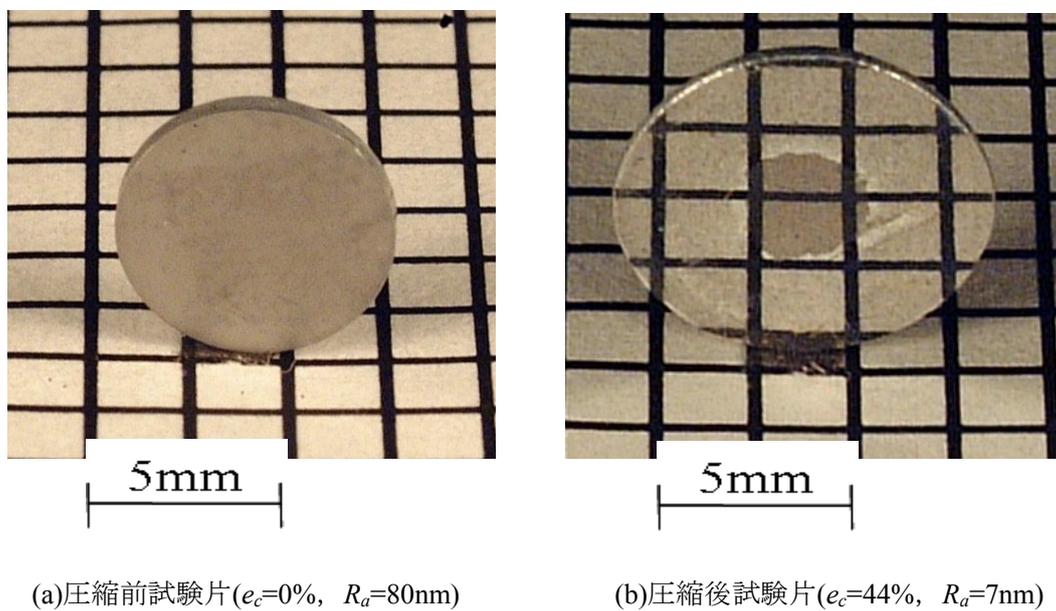


Fig.3.17 圧縮前後の試験片の外観(Tool-2, t-4, A1050-H)



Fig.3.18 圧縮後の工具表面の外観(Tool-2, t-4, A1050-H, $e_c=44\%$, $\gamma=9\%$)

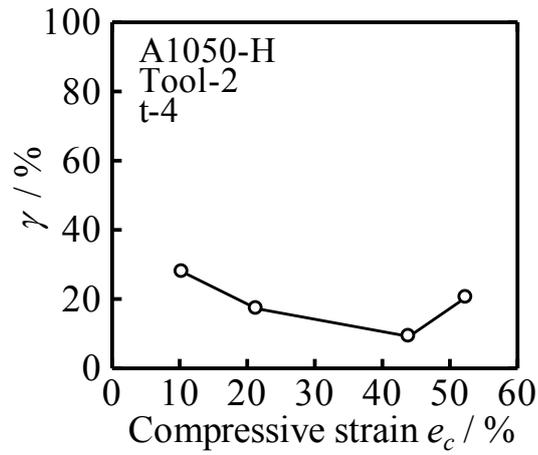


Fig.3.19 工具表面のカーボン膜剥離面積率 γ と圧縮率 e_c の関係(Tool-2, t-4, A1050-H)

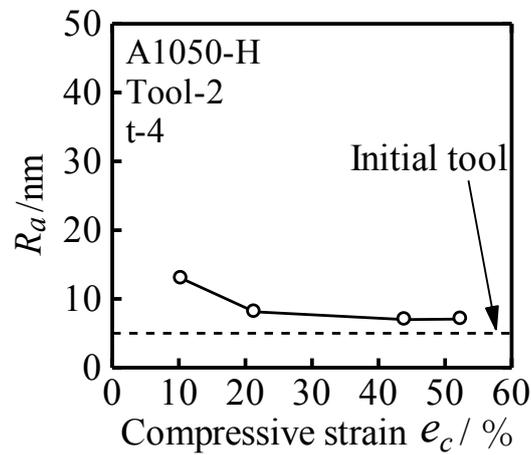


Fig.3.20 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係(Tool-2, t-4, A1050-H)

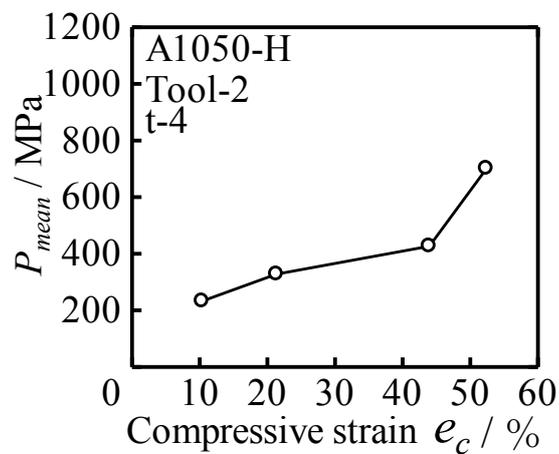


Fig.3.21 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係(Tool-2, t-4, A1050-H)

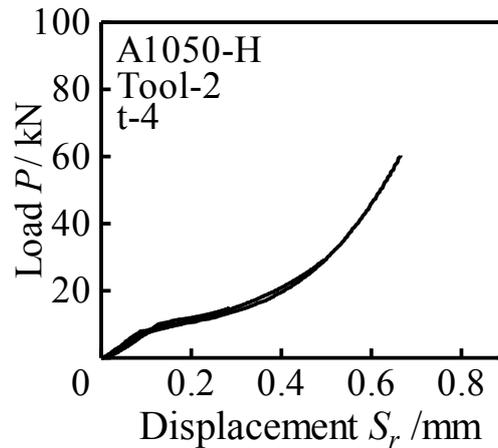


Fig.3.22 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係(Tool-2, t-4, A1050-H)

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.3.23 に試験片初期表面の AFM 像を, Fig.3.24 に $e_c=44\%$ に圧縮した試験片の AFM 像を示す. Tool-1 と同様に, 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.3.25 に算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 中心部では, 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高いほど平滑化される. 外周部でも, 圧縮率が高いほど平滑化されているが, 圧縮率 $e_c=50\%$ を超えるとわずかに算術平均面粗さ S_a が大きくなる様子が見られる. またどの圧縮率においても中心部よりも外周部がわずかに平滑化される傾向があるが, 初期工具と同程度の平滑度は得られなかった. Fig.3.9 と比較すると, Tool-1 ではばらつきが大きく平滑化されない場合が多いのに対し, Tool-2 では明らかに平滑化されている.

Fig.3.26 に算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. 低圧縮率では Tool-1 と同様に中心部も外周部も同程度に平滑化されているが, 初期工具と同程度の平滑度は得られなかった. 高圧縮率において, Tool-1 では中心部よりも外周部で S_a が大きくなる傾向が見られたが, Tool-2 では中心部より外周部で S_a が小さくなり平滑化が進む様子が見られる.

Fig.3.27 に測定箇所 $r=0\text{mm}$, Fig.3.28 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. $r=0\text{mm}$ では Tool-1 と同様に, 測定方向による R_{ae} に違いは見られない. $r=3\text{mm}$ でも Tool-1 と同様に, わずかではあるが, θ 方向よりも r 方向の方が R_{ae} が小さくなる傾向が見られる. これは r 方向に材料が流動するため, しごき効果により r 方向に平滑化されるためであると考えられる.

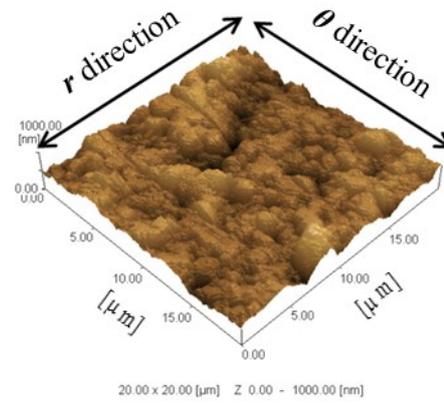
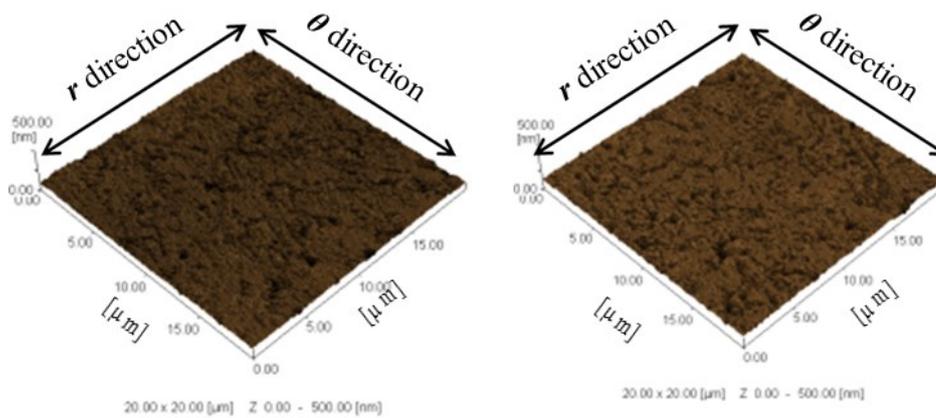


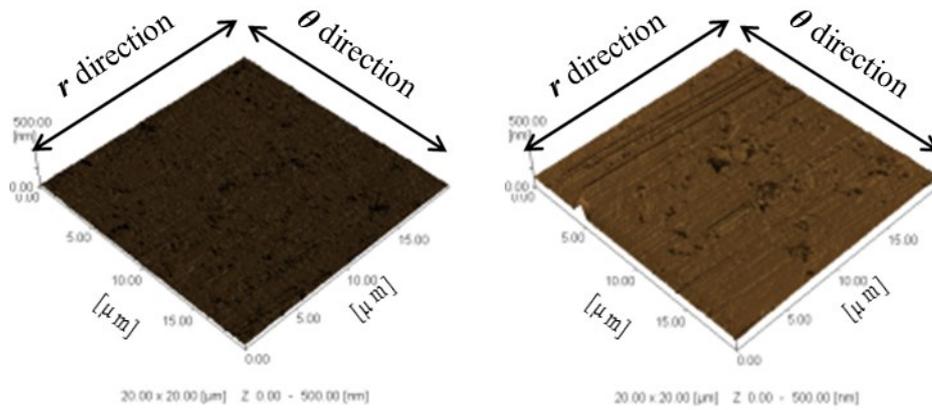
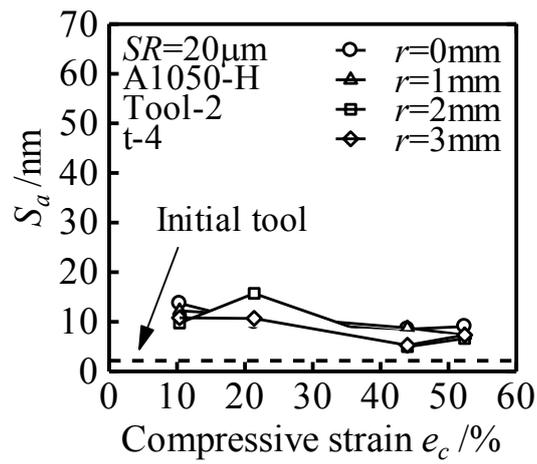
Fig.3.23 初期試験片の AFM 像の例($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)

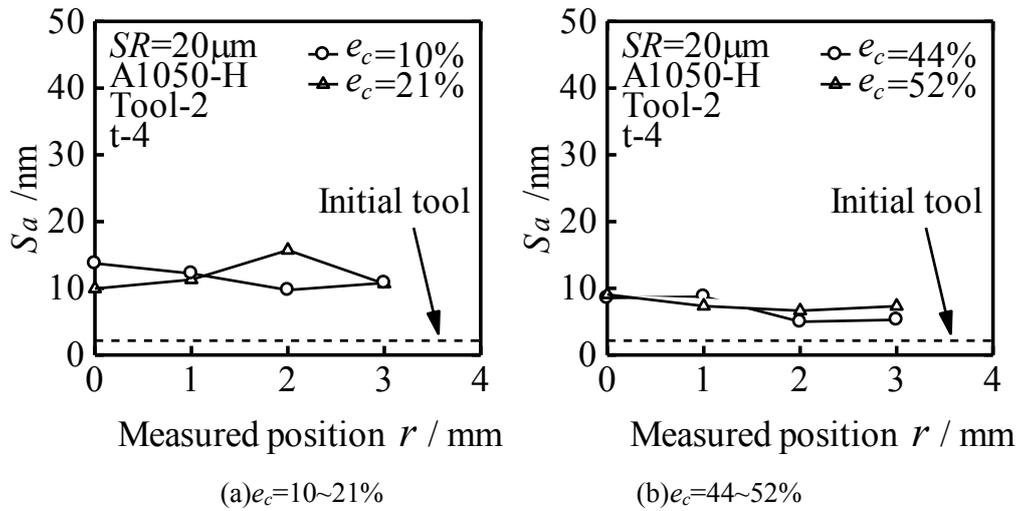
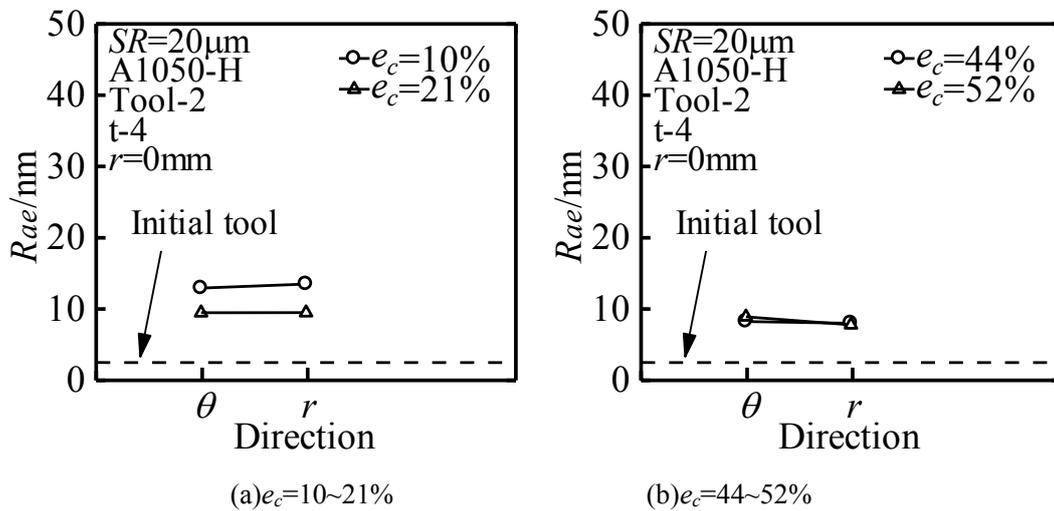
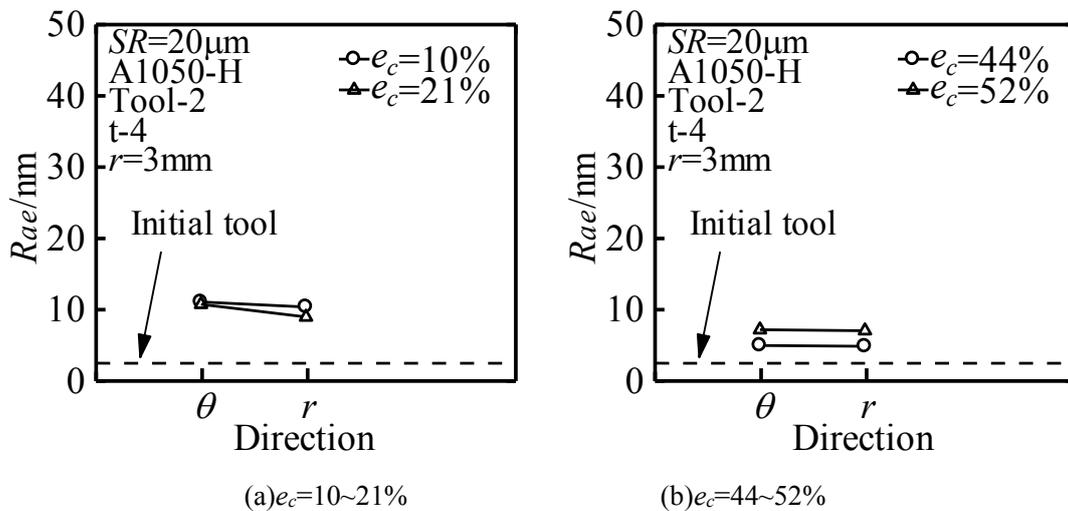


(a) 測定箇所 $r=0\text{mm}$

(b) 測定箇所 $r=1\text{mm}$

Fig.3.24 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像($e_c=44\%$, $SR=20\mu\text{m}$, Tool-2, t-4, A1050-H)

(c) 測定箇所 $r=2\text{mm}$ (d) 測定箇所 $r=3\text{mm}$ Fig.3.24 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像($e_c=44\%$, $SR=20\mu\text{m}$, Tool-2, t-4, A1050-H)Fig.3.25 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, t-4, A1050-H)

Fig.3.26 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (Tool-2, t-4, A1050-H)Fig.3.27 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=0\text{mm}$, Tool-2, t-4, A1050-H)Fig.3.28 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=3\text{mm}$, Tool-2, t-4, 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.3.29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 $e_c=52\%$ 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.3.30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 にばらつきがあることから、各実験での潤滑状態は違いがあると考えられる。

Fig.3.31にTool-2, t-4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.3.15と比較すると、同程度の圧縮率、すべり量でTool-1よりTool-2の方が面圧は小さくなっている。

Fig.3.32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。剥離が少なかったため、Tool-1のように相対すべり量 L_s が大きくなると算術平均面粗さ S_a も大きくなる様子は見られない。低圧縮率では相対すべり量 L_s による算術平均面粗さ S_a の違いはあまり見られないが、高圧縮率では相対すべり量 L_s が大きくなると算術平均面粗さ S_a は小さくなる傾向が見られる。これは高圧縮率では材料流動によるしごき効果によって平滑化が進んだためだと考えられる。

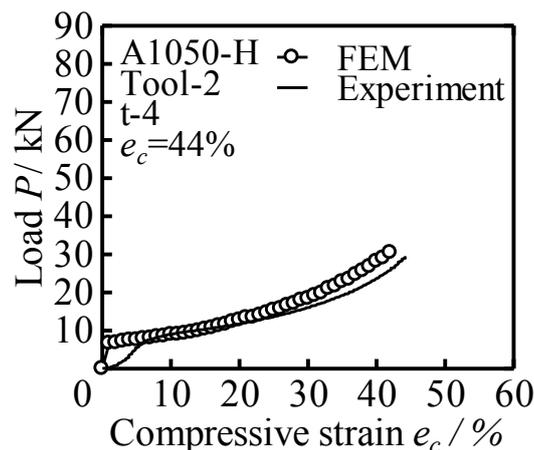


Fig.3.29 荷重 P と圧縮率 e_c の関係(Tool-2, t-4, A1050-H)

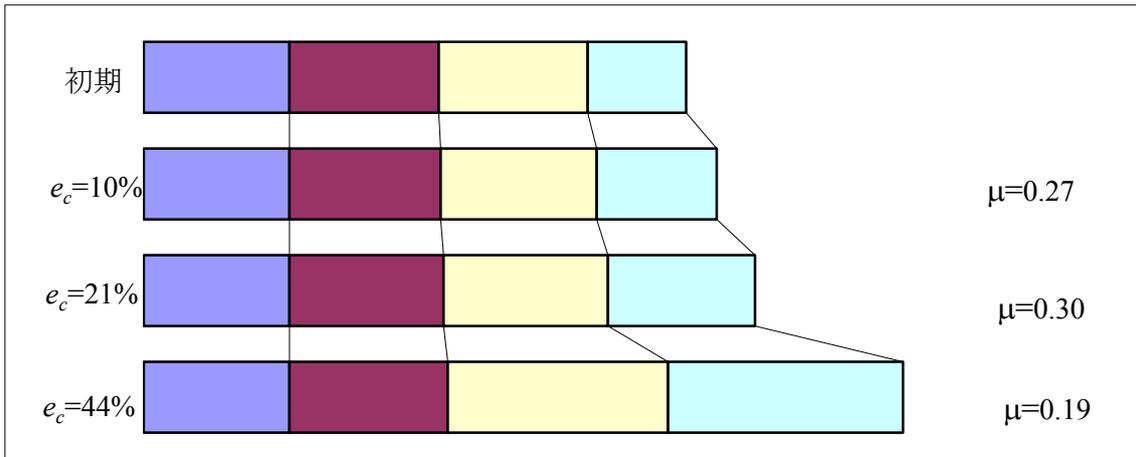


Fig.3.30 FEM解析による変形の様子(Tool-2, t-4, A1050-H)

($e_c=10\% : \mu=0.27$, $e_c=21\% : \mu=0.3$, $e_c=44\% : \mu=0.19$)

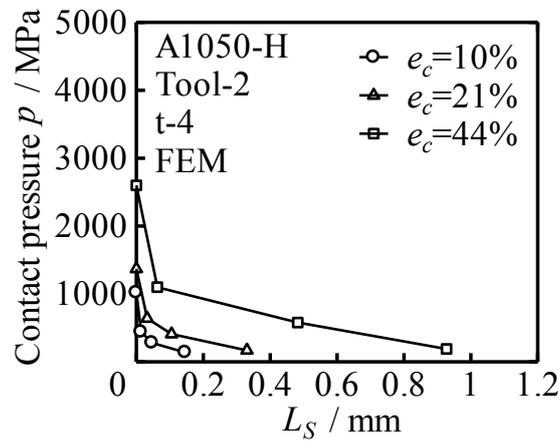


Fig.3.31 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係(Tool-2, t-4, A1050-H)

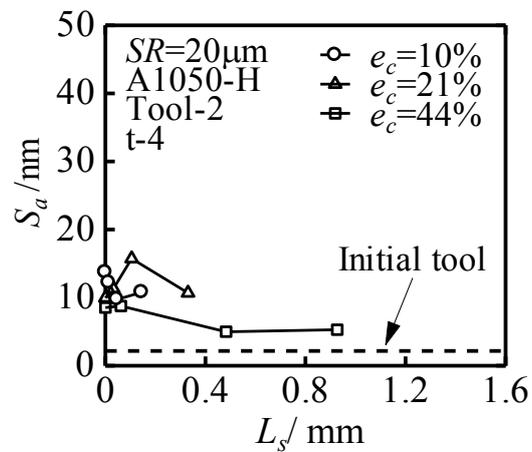


Fig.3.32 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係(Tool-2, t-4, A1050-H)

3.3 Tool-1($R_a=10\text{nm}$), DLC-B, A1050-H における実験結果

3.3.1 圧縮率と表面粗さの関係

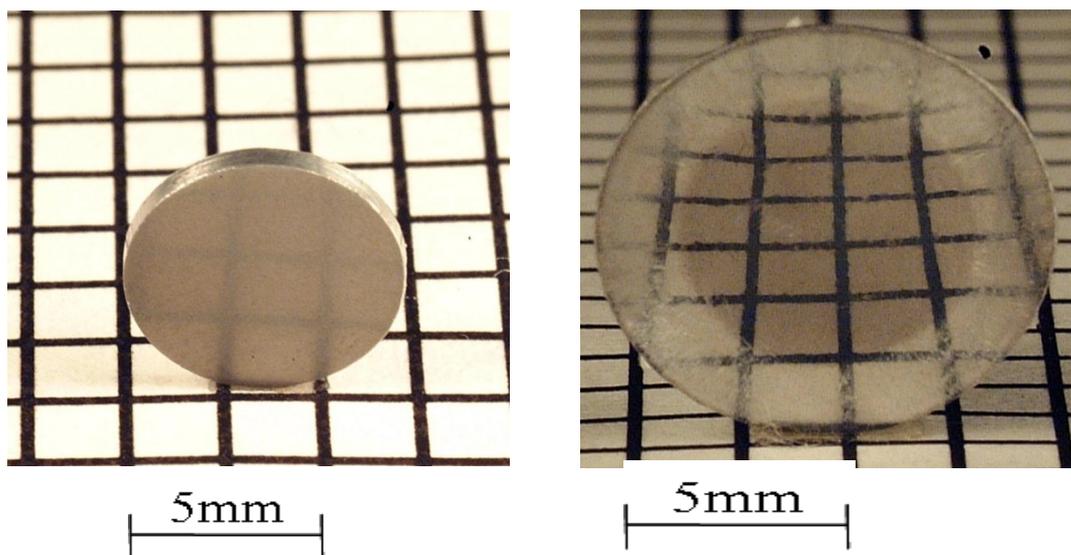
Fig.3.33 に圧縮前と平滑化が進んでいる圧縮率 $e_c=52\%$ の試験片の外観を示す。圧縮加工により試験片表面が鏡面化された様子がわかる。

Fig.3.34 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.3.35 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。圧縮率の傾向による違いは見られないが、高圧縮率において R_a が大きくなる場合がある。

Fig.3.36 に DLC-B 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.3.37 に DLC-B 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。



(a) 圧縮前試験片

(b) 圧縮後試験片($e_c=52\%$)

Fig.3.33 圧縮前後の試験片の外観 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)

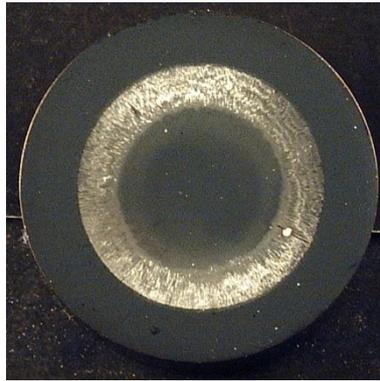


Fig.3.34 圧縮後工具表面 (Too-1, DLC-B, A1050-H, $e_c=52\%$)

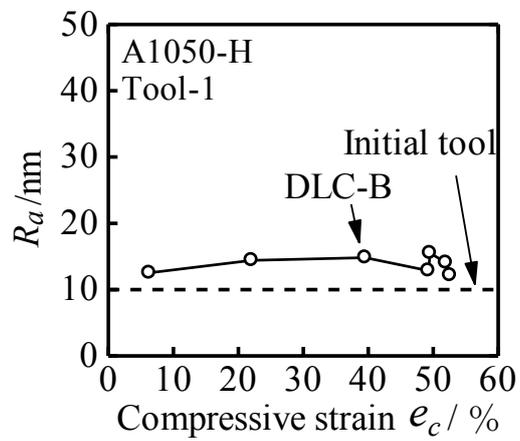


Fig.3.35 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)

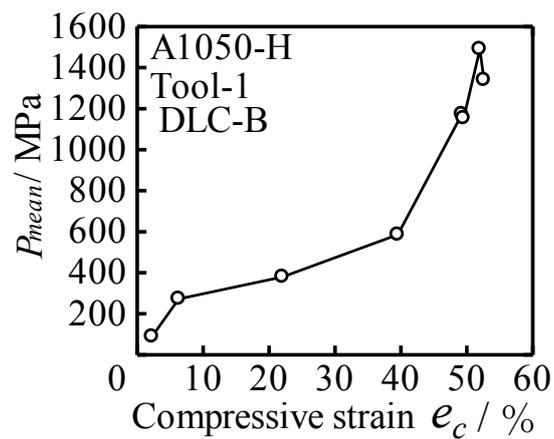


Fig.3.36 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)

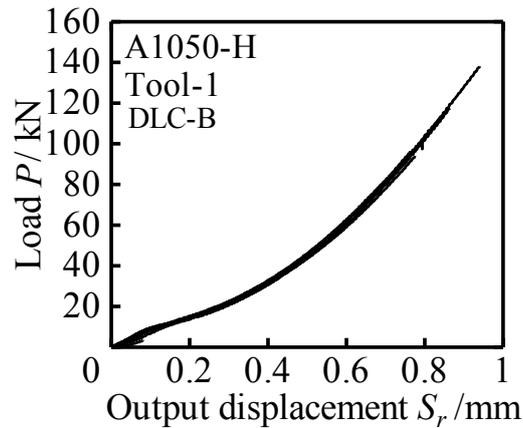


Fig.3.37 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)

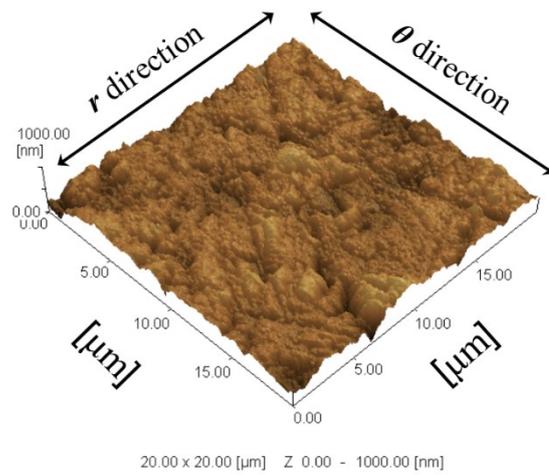
3.3.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価

AFM を用いて試験片の局所的な観察を行った。Fig.3.38 に試験片初期表面の AFM 像を、Fig.3.39 に $e_c=52\%$ 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.3.40 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むが、50%付近では S_a が大きくなる様子も見られる。これは高圧縮率で工具表面状態が悪化したためと考えられる。

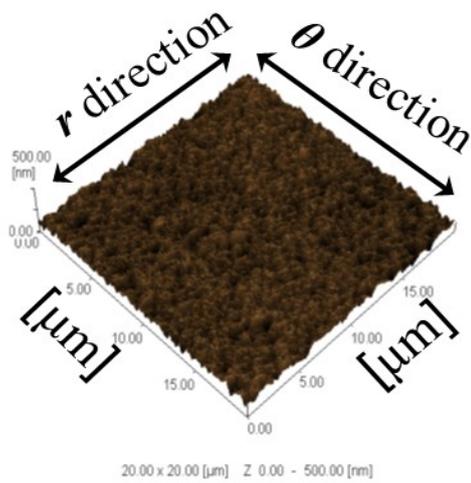
Fig.3.41 に算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。いずれの圧縮率でも中心部より外周部で平滑化される傾向が見られる。また、圧縮率が 53% の外周部で最も平滑化が進んでいることがわかる。

Fig.3.42 に測定箇所 $r=1\text{mm}$ 、Fig.3.43 に測定箇所 $r=3\text{mm}$ での算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係を示す。 $r=1\text{mm}$ 、 $r=3\text{mm}$ とともに測定方向による R_{ae} の違いは見られない。

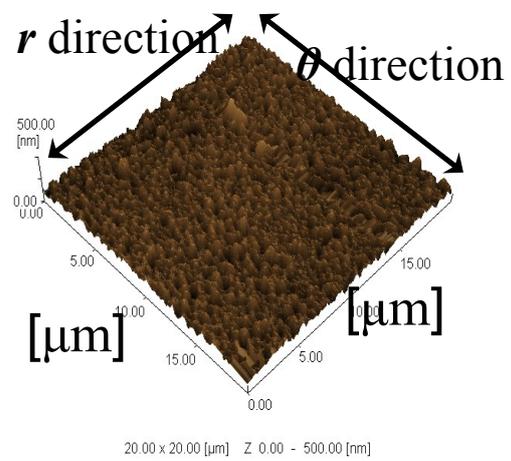


($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)

Fig.3.38 試験片初期工具の AFM 像の例



(a) 測定箇所 $r=0\text{mm}$



(b) 測定箇所 $r=1\text{mm}$

Fig.3.39 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像の例

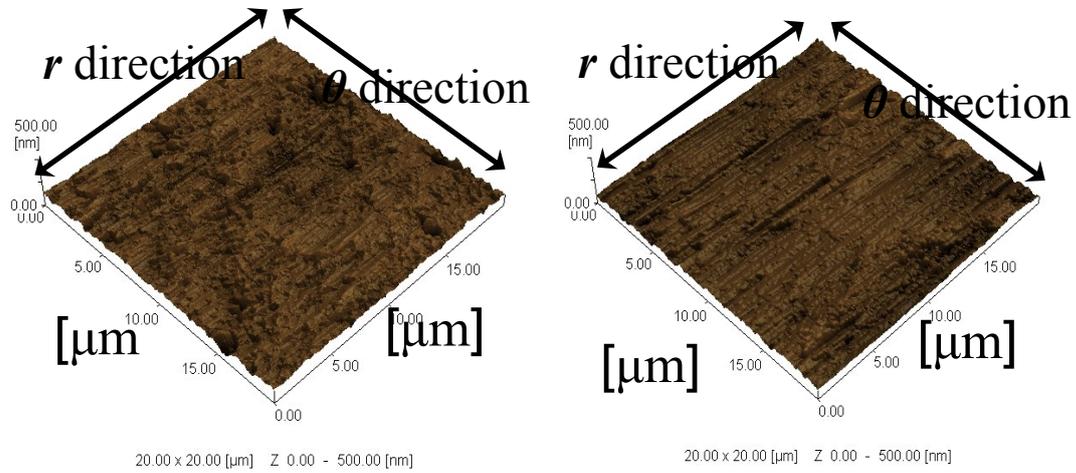
(c) 測定箇所 $r=2\text{mm}$ (d) 測定箇所 $r=3\text{mm}$

Fig.3.39 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像の例
 ($e_c=52\%$, $SR=20\mu\text{m}$, Tool-1, DLC-B, A1050-H)

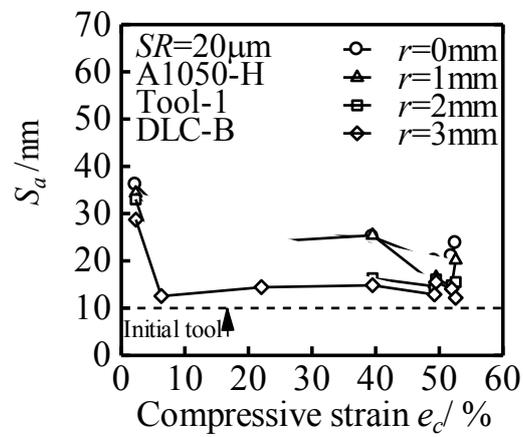
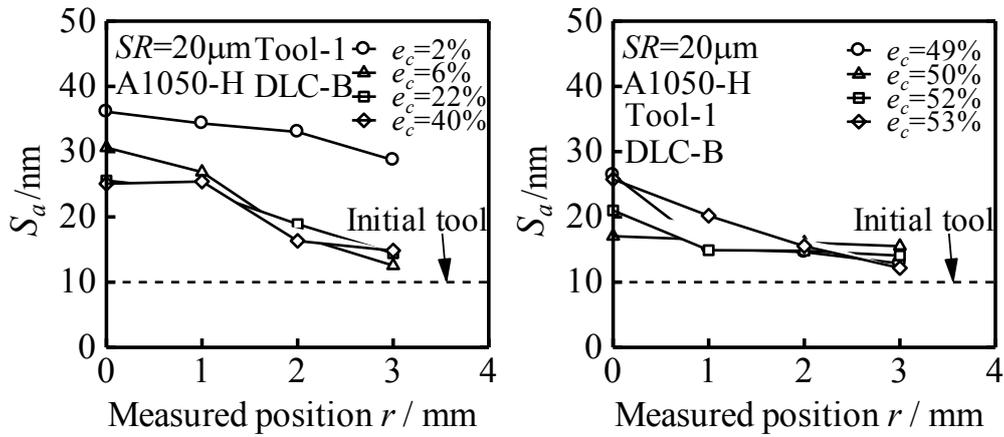
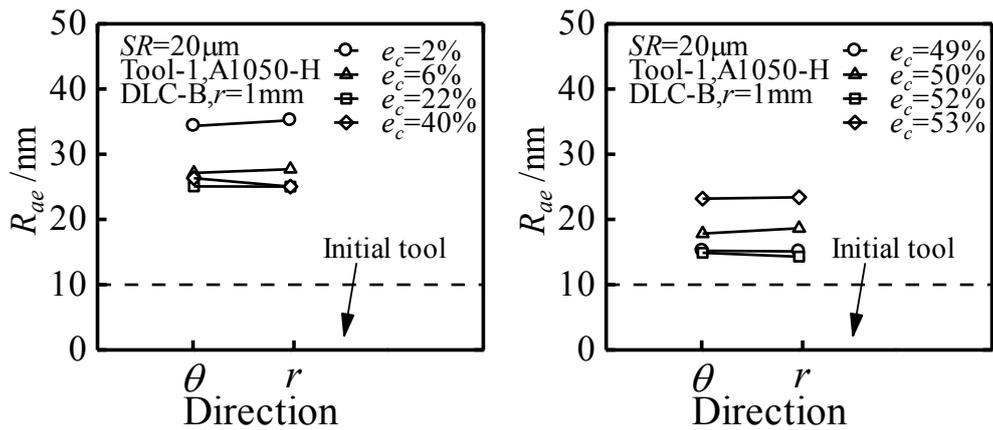


Fig.3.40 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)

(a) $e_c=2\sim 40\%$ (b) $e_c=49\sim 53\%$ Fig.3.41 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)(a) $e_c=2\sim 40\%$ (b) $e_c=49\sim 53\%$ Fig.3.42 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=1\text{mm}$, Tool-1, DLC-B, A1050-H)

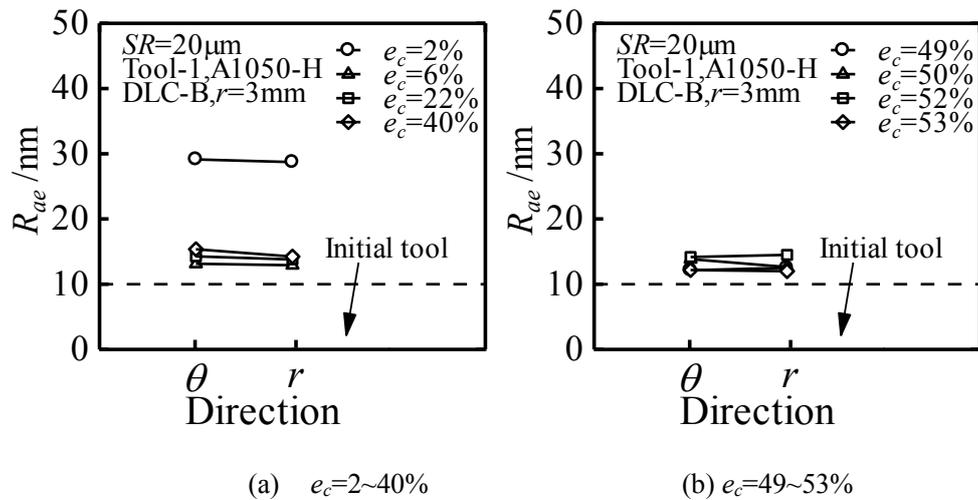


Fig.3.43 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 ($r=3\text{mm}$, Tool-1, DLC-B, A1050-H)

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.3.44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 $e_c=2\%$, 6% , 49% , 50% , 51% , 52% 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.3.45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 にばらつきがあることから、各実験での潤滑状態は違いがあると考えられる。

Fig.3.46にDLC-B, Tool-1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.3.47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、 $e_c=40\%$ では相対すべり量が大きい場合は 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。

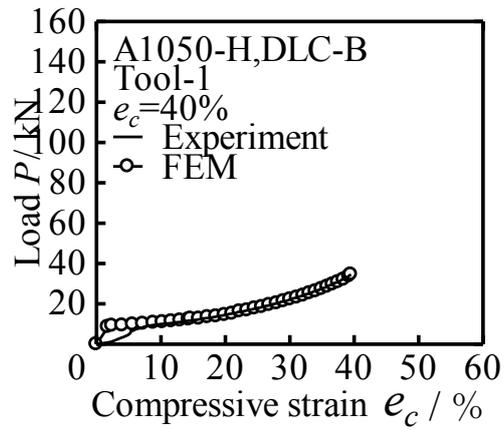


Fig.3.44 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)

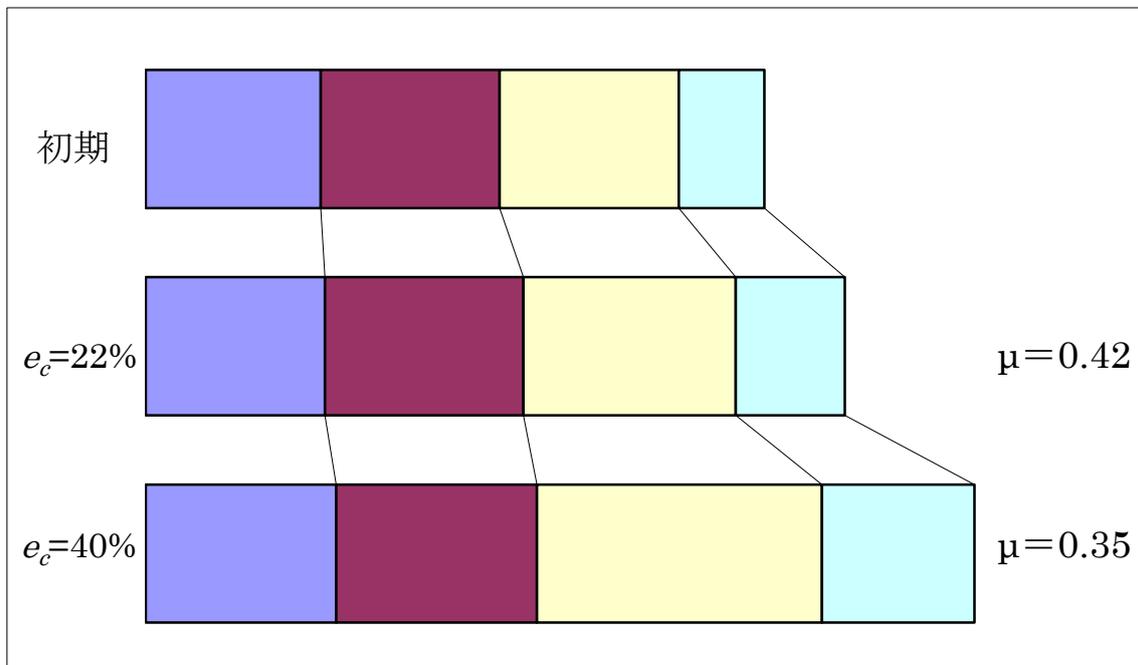
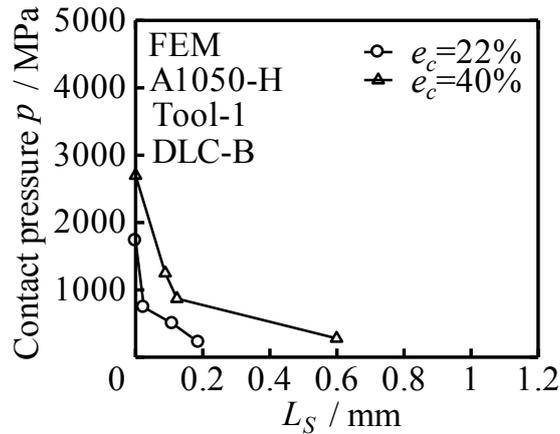
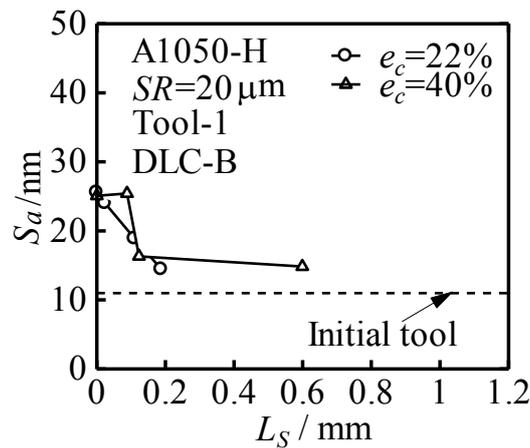


Fig.3.45 FEM 解析による変形の様子 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)
($e_c=22\%:\mu=0.42$, $e_c=40\%:\mu=0.35$)

(a) $e_c=22\sim40\%$ Fig.3.46 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)(a) $e_c=22\sim40\%$ Fig.3.47 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)

3.4 カーボン蒸着工具における工具表面粗さの影響

カーボン蒸着工具における工具表面粗さの影響を調べるため、各膜厚において算術平均粗さ $R_a=10\text{nm}$ (Tool-1), $R_a=5\text{nm}$ (Tool-2)の工具で比較を行った。

3.4.1 圧縮率と表面粗さの関係

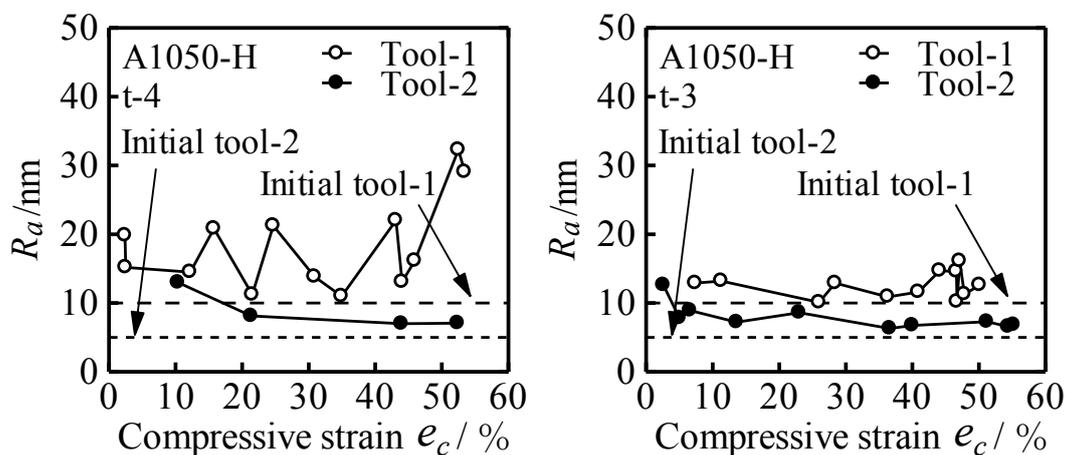
Fig.3.48 に各条件での触針式表面粗さ計より得られた算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。t-4 において、Tool-1 では R_a のばらつきが大きく初期工具ほどの平滑度が得られない場合が多く、Tool-2 ではどの圧縮率でも Tool-1 より平滑化される。t-3 では、t-4 と同様に Tool-1 よりも Tool-2 の方が全体的に平滑化されていることがわかる。t-2 では、t-4 との

違いが見られ、Tool-1 と Tool-2 の R_a に大きな違いは見られない。t-4, t-3 はともに Tool-1 よりも Tool-2 の方が平滑化されるが、t-2 では Tool-1 と Tool-2 の結果に大きな差は見られない。

Fig.3.49 に各条件での剥離面積率 γ と圧縮率 e_c の関係を示す。t-4 において、高圧縮率では明らかに Tool-2 の方が剥離が少なく、低圧縮率では Tool-1 の方が剥離が少ない場合もあれば剥離が大きい場合がある。t-3 において、高圧縮率では t-4 と同様に Tool-2 の方が剥離は少なく、低圧縮率でも Tool-2 の方が剥離が少ない傾向がある。t-2 では、t-4 との違いが見られ、Tool-1 と Tool-2 に大きな差はない。

Fig.3.50 に各条件での平均面圧 p_{meant} と圧縮率 e_c の関係を示す。t-4 では、低圧縮率において Tool-1 と Tool-2 に違いは見られないが、高圧縮率においては Tool-1 の方が平均面圧が高いことがわかる。t-3 では、t-4 ほどではないが高圧縮率において Tool-1 のほうが平均面圧が高くなる傾向がある。t-2 では、t-4 のような違いは見られず Tool-1 と Tool-2 に大きな違いは見られない。

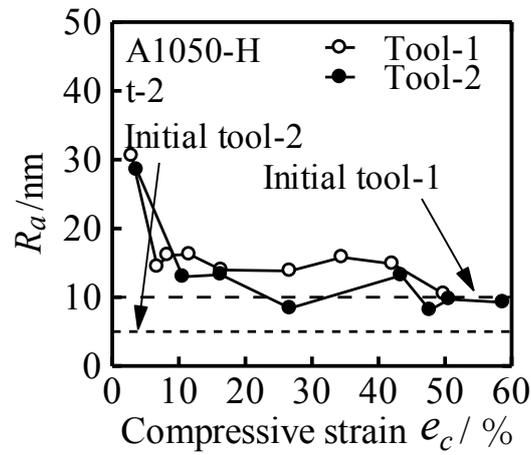
Fig.3.51 に各条件での荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係を示す。t-4 では、高圧縮率で Tool-1 の方が荷重が高い傾向が見られる。t-3 では、t-4 と同様に Tool-1 の方が荷重が高い傾向がある。t-2 では、t-4 のような違いは見られず Tool-1 と Tool-2 に大きな違いは見られない。



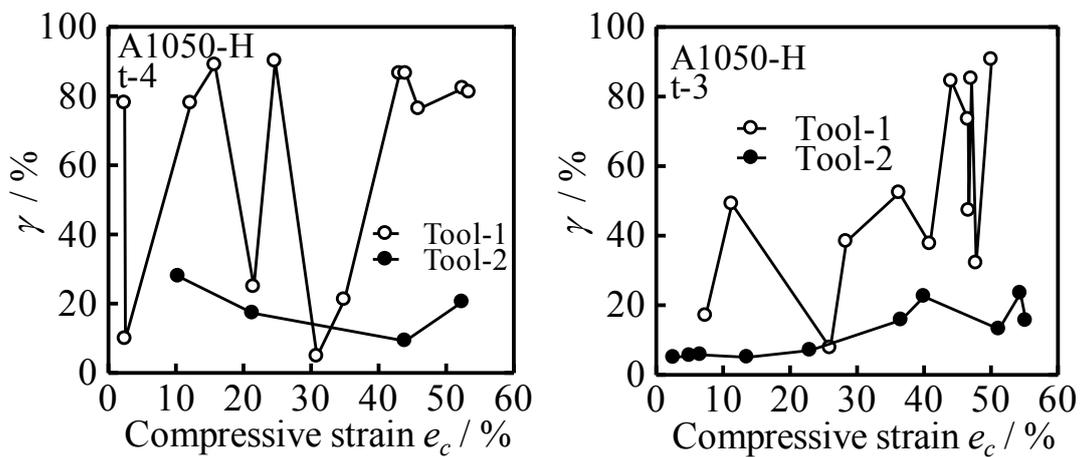
(a)A1050-H, t-4

(b)A1050-H, t-3

Fig.3.48 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (A1050-H)

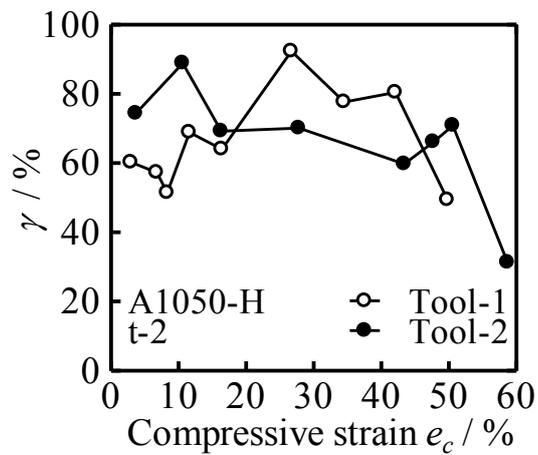


(c)A1050-H, t-2

Fig.3.48 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係(A1050-H)

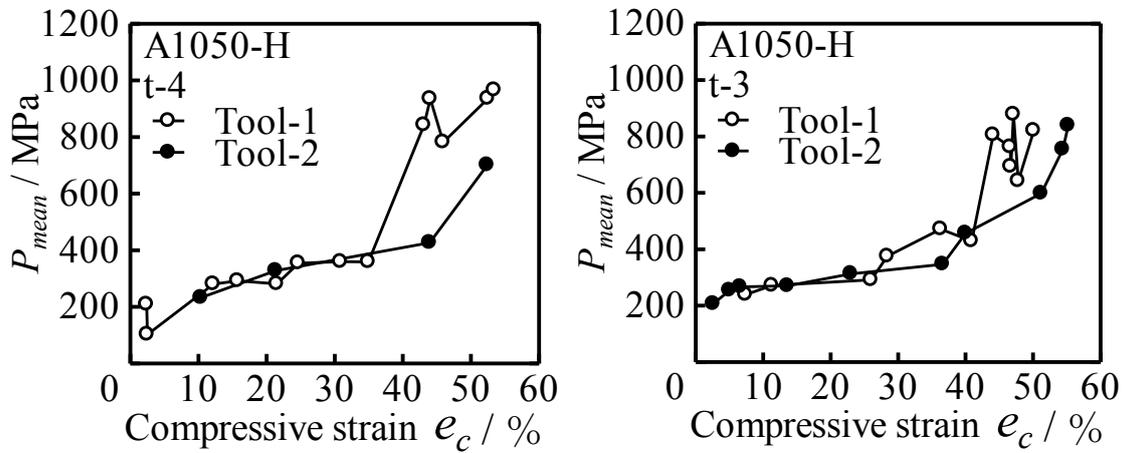
(a)A1050-H, t-4

(b)A1050-H, t-3



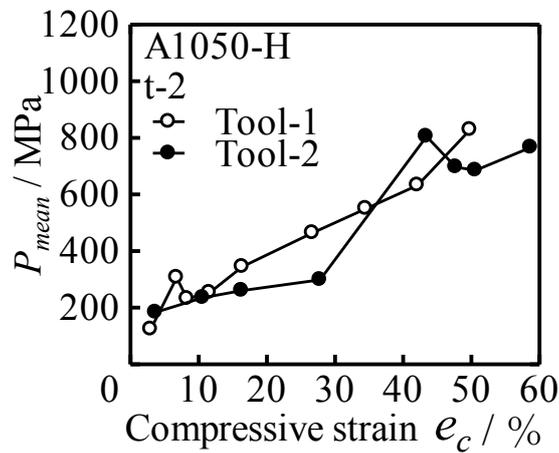
(c)A1050-H, t-2

Fig.3.49 工具表面のカーボン膜剥離面積率 γ と圧縮率 e_c の関係(A1050-H)

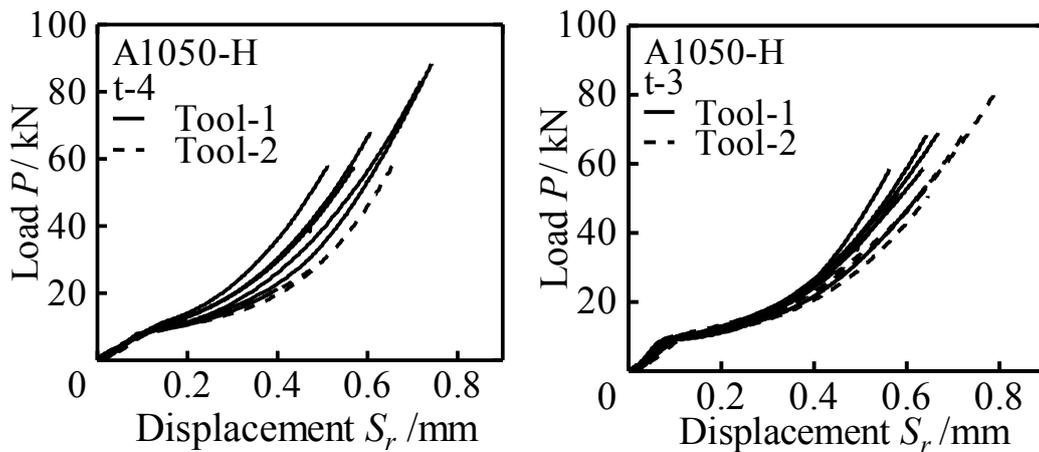


(a)A1050-H, t-4

(b)A1050-H, t-3



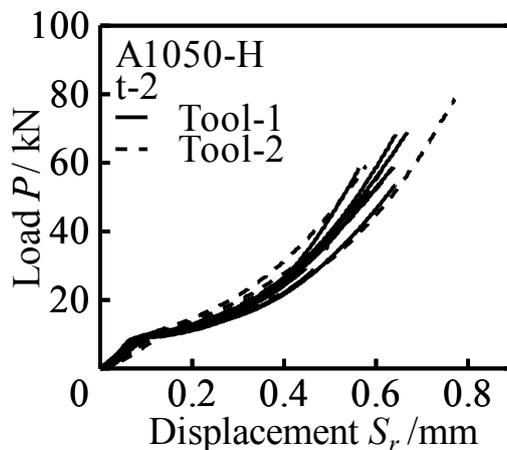
(c)A1050-H, t-2

Fig.3.50 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係(A1050-H)

(a)A1050-H, t-4

(b)A1050-H, t-3

Fig.3.51 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係(A1050-H)



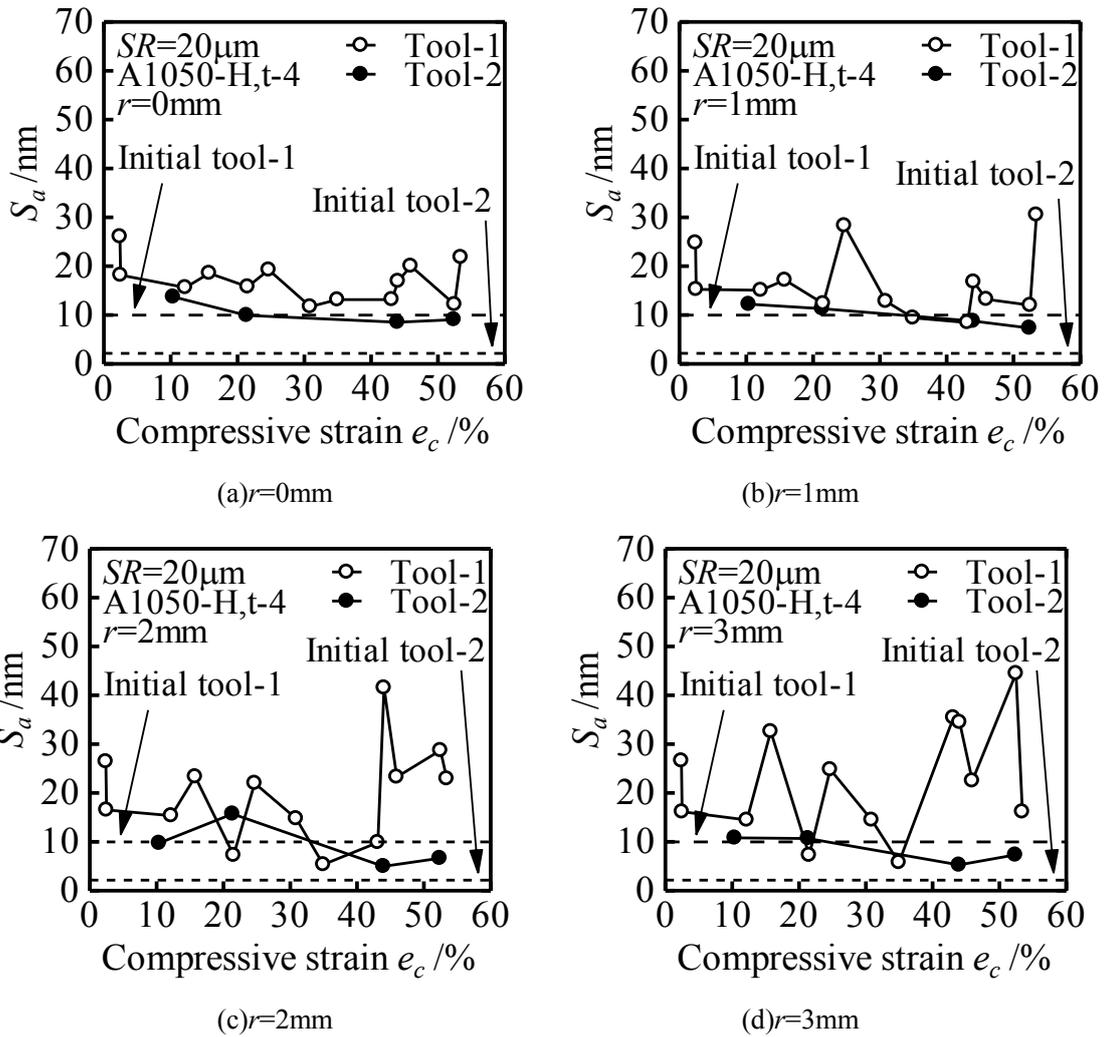
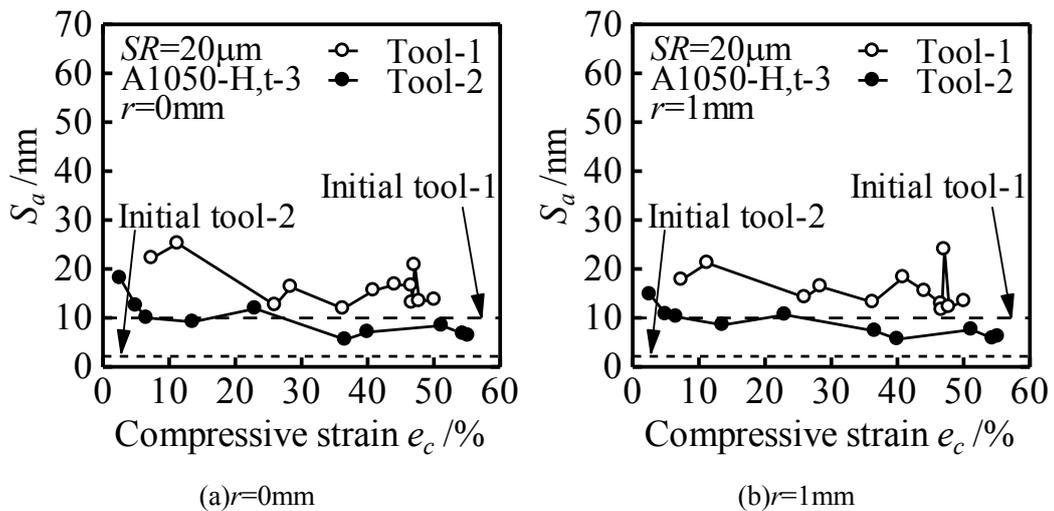
(c)A1050-H, t-2

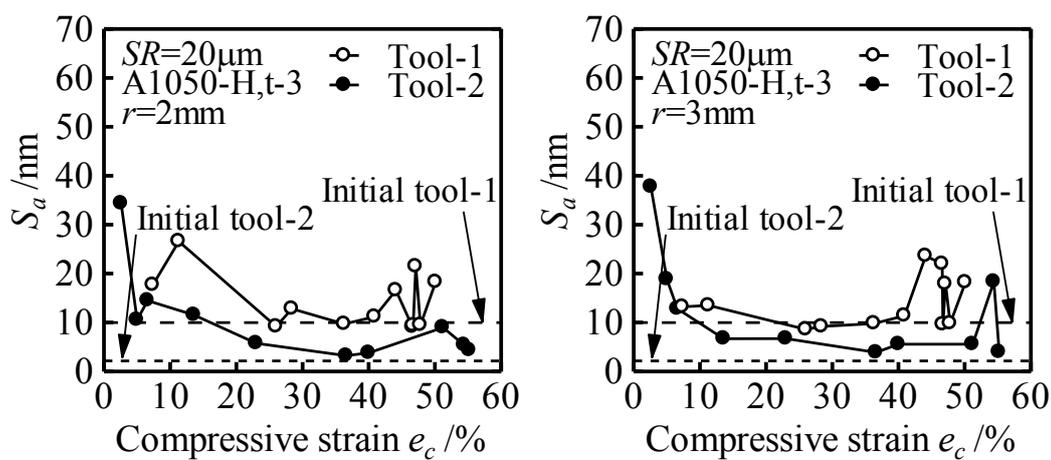
Fig.3.51 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係(A1050-H)

3.4.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価

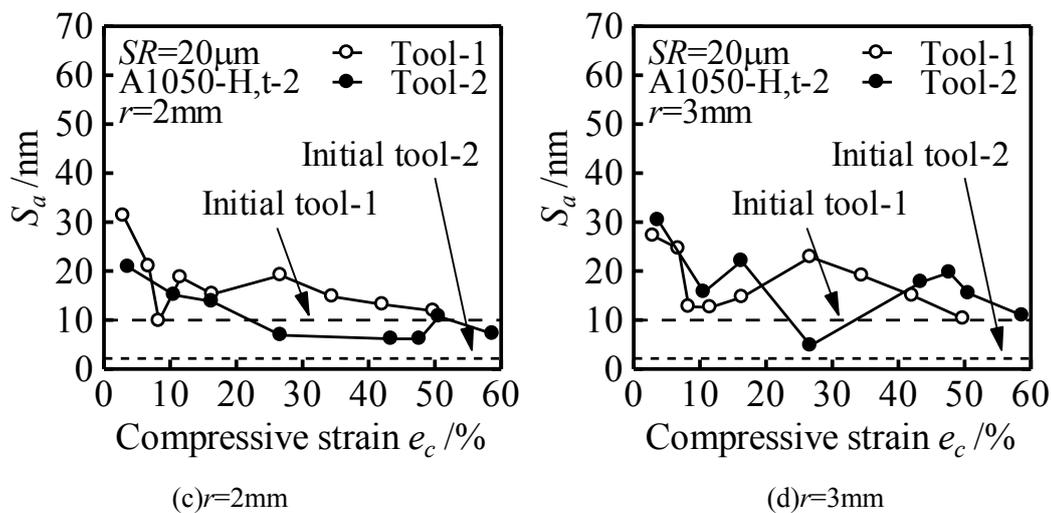
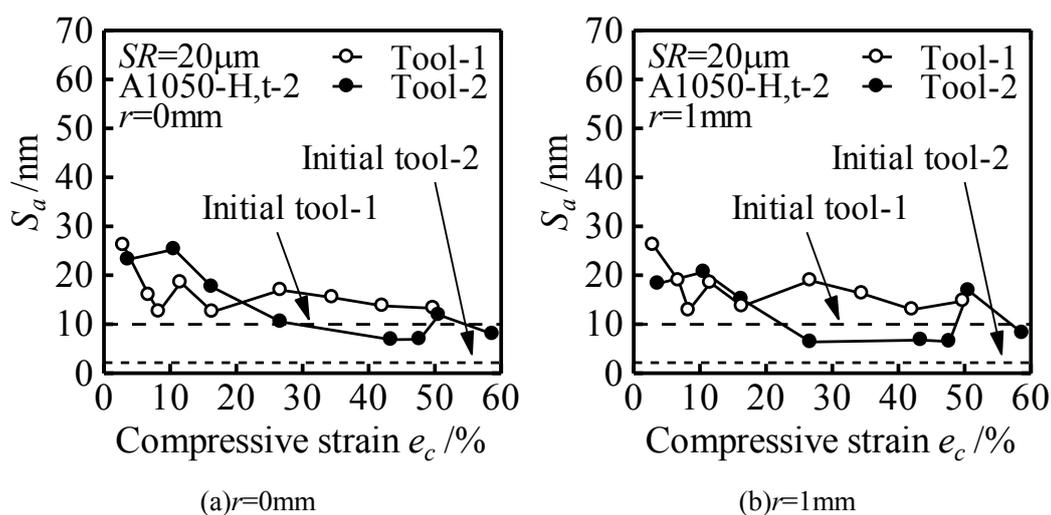
Fig.3.52 に t-4, Fig.3.53 に t-3, Fig.3.54 に t-2 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. t-4 において, 中心部ではどの圧縮率でも Tool-1 よりも Tool-2 の方が平滑化される傾向がある. 外周部では, Tool-1 よりも Tool-2 の方がカーボン膜の剥離が少ないため, Tool-2 の方が平滑化される傾向があるが, Tool-1 でも剥離が少ない場合は Tool-2 と同程度に平滑化される場合がある. t-3 において, 中心部では t-4 同様に Tool-1 より Tool-2 の方が平滑化される傾向がある. 外周部では, t-4 のように Tool-1 が Tool-2 と同程度に平滑化されることはなく, 全体的に Tool-1 よりも Tool-2 の方が平滑化される. t-2 において, どの測定箇所でも圧縮率 20%~40%では t-4 と同様に Tool-1 より Tool-2 の方が平滑化されるが, 低圧縮率と高圧縮率では t-4 のように Tool-1 と Tool-2 には大きな違いが見られない.

以上のことから, Tool-1 において t-4 では初期工具以上に平滑化される場合があるがばらつきが大きく, t-3 では初期工具程度に平滑化され, ばらつきが少ないため, t-3 を用いた方が良いと考えられる. Tool-2 において t-4, t-3 はどちらも Tool-1 以上に平滑化される. したがって, Tool-2 に膜厚 $t=40\text{nm}$ (t-3)のカーボン蒸着膜を施すのが最も良いと考えられる.

Fig.3.52 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係(A1050-H, t-4)Fig.3.53 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係(A1050-H, t-3)



(c) $r=2\text{mm}$ (d) $r=3\text{mm}$
 Fig.3.53 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係(A1050-H, t-3)



(c) $r=2\text{mm}$ (d) $r=3\text{mm}$
 Fig.3.54 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係(A1050-H, t-2)

3.5 カーボン蒸着膜膜厚の影響

カーボン蒸着膜の膜厚の影響を調べるため、Tool-1, Tool-2 において膜厚 $t=100\text{nm}(t-4)$, $t=40\text{nm}(t-3)$, $t=20\text{nm}(t-2)$ で比較を行った。

3.5.1 圧縮率と表面粗さの関係

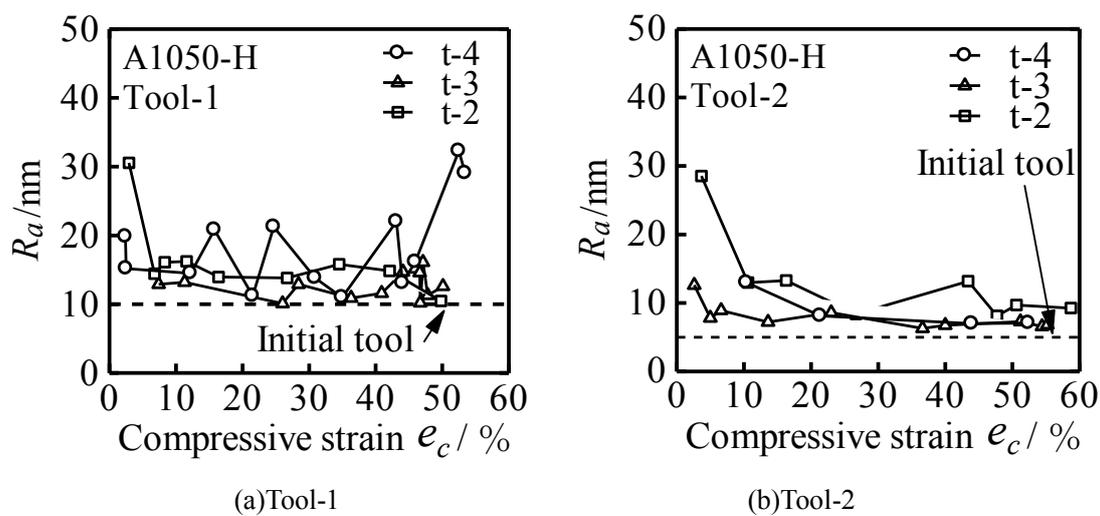
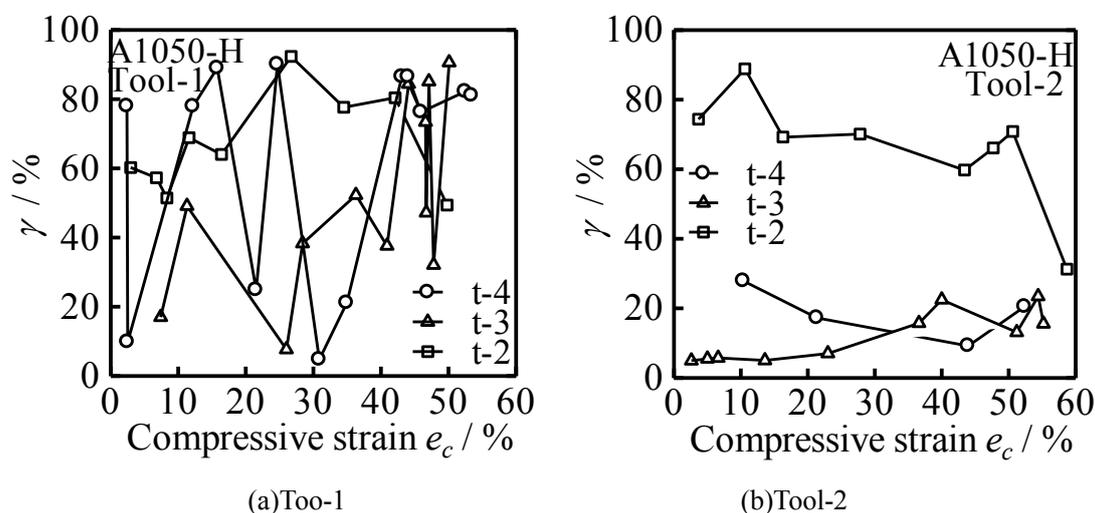
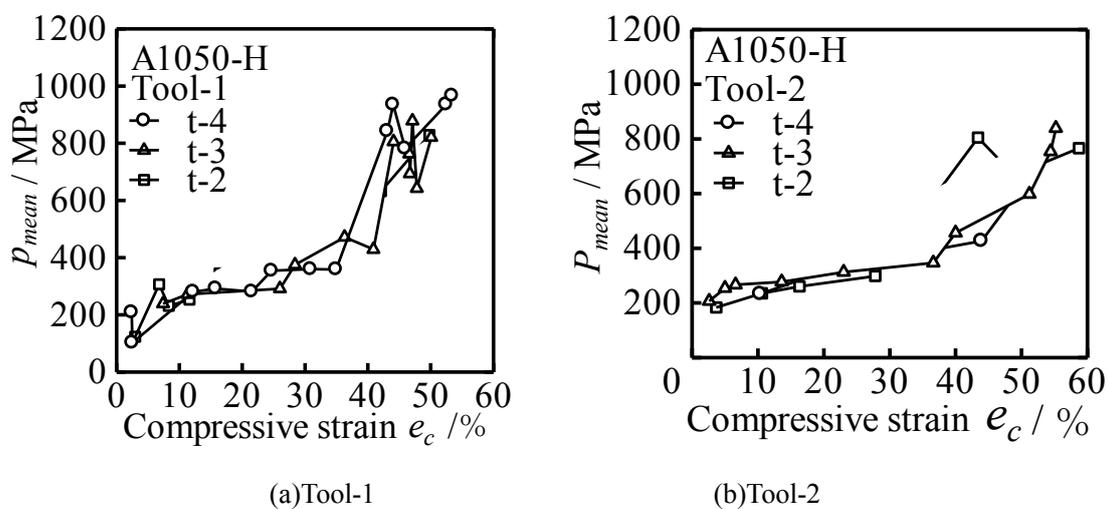
Fig.3.55 に各条件で触針式表面粗さ計より得られた算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。Tool-1 において、どの圧縮率でも $t-2$ より $t-3$ の方が平滑化され、 $t-4$ でも平滑化された場合は $t-3$ と同程度に平滑化されるが、ばらつきが大きく平滑化されなかった場合は $t-2$ よりも R_a が大きくなることがわかる。これはカーボン蒸着膜が剥離し金属同士が直接接触したため表面が粗くなったと考えられる。Tool-2 において、低圧縮率ではどの膜厚にも違いはあまり見られないが、高圧縮率では $t-4$, $t-3$ が同程度に平滑化される傾向が見られる。

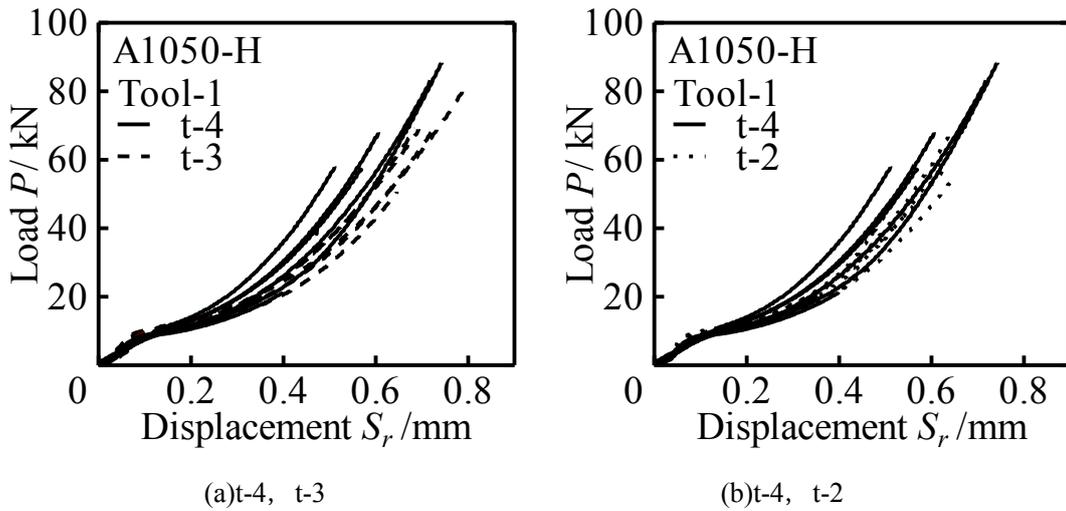
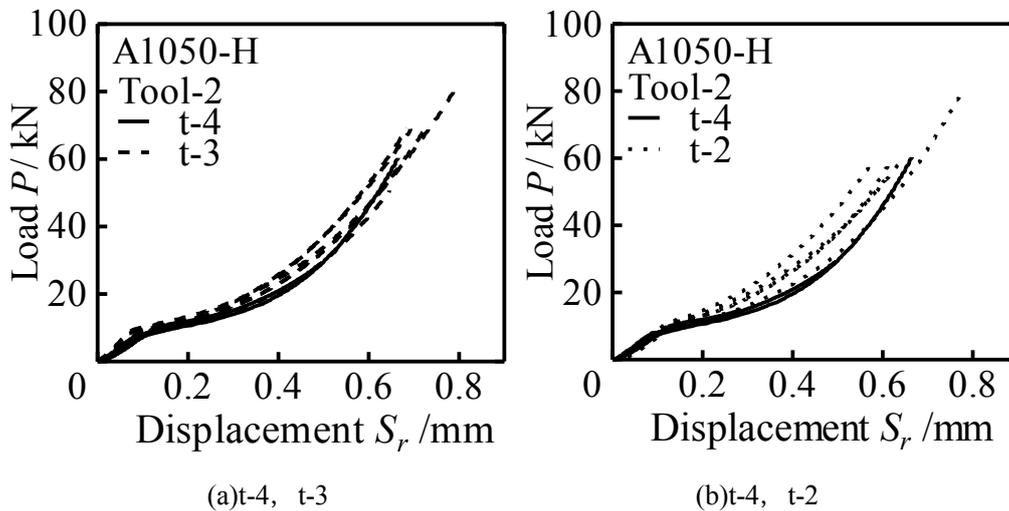
Fig.3.56 に各条件での工具表面カーボン膜剥離面積率 γ と圧縮率 e_c の関係を示す。Tool-1 において、低圧縮率では $t-2$ は剥離が大きく $t-3$ は剥離は少ないが、 $t-4$ は剥離が生じるときとそうでないときのばらつきが大きくなる傾向が見られる。高圧縮率ではどの膜厚でも剥離は大きい。Tool-2 において、 $t-2$ よりも明らかに $t-3$, $t-4$ では剥離が少ないことがわかる。Tool-1 の低圧縮率において $t-3$ で剥離が少なく $t-4$ で剥離が大きくなる傾向があり、Tool-2 ではどの圧縮率でも $t-3$, $t-4$ で剥離が少ないことから、膜厚を $t=100\text{nm}$ まで厚くする必要はなく $t=40\text{nm}$ 程度で良いと考えられる。

Fig.3.57 に各条件での平均面圧 p_{meant} と圧縮率 e_c の関係を示す。Tool-1 において、膜厚による大きな違いは見られないが、圧縮率 20%~40%では $t-2$ の平均面圧がわずかに高くなることがわかる。また圧縮率 50%を超えると $t-4$ の平均面圧は高くなることがわかる。Tool-2 において、低圧縮率ではあまり違いは見られないが高圧縮率では $t-2$ よりも $t-3$, $t-4$ の平均面圧が低くなり、潤滑状態が良いと考えられる。

Fig.3.58 に Tool-1 の各条件での荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係を示す。 $t-4$ と $t-3$ を比べると、変位が小さいところでは大きな違いはみられないが、変位が大きくなると $t-4$ の方が荷重は大きくなることがわかる。 $t-4$ と $t-2$ を比べても、 $t-3$ ほどの差はないが $t-4$ の方が荷重は大きくなる傾向がある。

Fig.3.59 に Tool-2 の各条件での荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係を示す。 $t-4$ と $t-3$ を比べると、大きな違いは見られない。 $t-4$ と $t-2$ を比べると、 $t-2$ の方が荷重が大きくなることがわかる。

Fig. 3.55 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係(A1050-H)Fig. 3.56 工具表面カーボン膜剥離面積率 γ と圧縮率 e_c (A1050-H)Fig. 3.57 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係(A1050-H)

Fig.3.58 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係(A1050-H, Tool-1)Fig.3.59 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係(A1050-H, Tool-2)

3.5.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価

Fig.3.60 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. 中心部では, どの圧縮率においても算術平均面粗さ S_a に膜厚ごとの違いは見られない. 外周部において, 低圧縮率では t-2 よりも t-3 の方が S_a は小さくなり t-4 でも同程度になる場合があるが, 剥離が大きい場合はどの膜厚よりも S_a は大きくなる. 高圧縮率では t-2, t-3 の S_a は同程度になり, t-4 はどの膜厚よりも S_a が大きくなる様子が見られる.

Fig.3.61 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. 中心部では Tool-1 と同様に膜厚ごとによる違いは見られず, どの膜厚でも高圧縮率ほど平滑化される傾向がある. 外周部において, 低圧縮率ではどの膜厚も S_a に違いは見られないが, 高圧縮率では t-3, t-4 は同程度に平滑化されて t-2 で S_a が大

きくなる傾向が見られる。

以上のことから、剥離等の発生しない中心部では膜厚による大きな違いは見られず、Tool-2 では初期工具ほどの平滑度は得られないが Tool-1 より平滑化することがわかった。外周部において、Tool-1 の低圧縮率では t-3 の剥離は少なく S_a も小さくなり平滑化される傾向があるが、t-4 の剥離にばらつきがあるため S_a にもばらつきが見られ、どの膜厚よりも S_a が大きくなる場合があった。高圧縮率ではどの膜厚でも剥離は大きく S_a も大きくなる傾向が見られるが、t-4 はどの膜厚よりも S_a が大きくなる傾向が見られた。Tool-2 は t-2 で剥離が起きるため、試験片の S_a は大きくなり、t-3、t-4 で剥離は少なく違いはあまりないことがわかった。したがって、t-4 は Tool-1 ではあまり平滑化されず、Tool-2 では平滑化されるが t-3 と大きな違いは見られないため、カーボン蒸着膜では膜厚を $t=100\text{nm}$ までする必要はなく $t=40\text{nm}$ 程度で良いと考えられる。

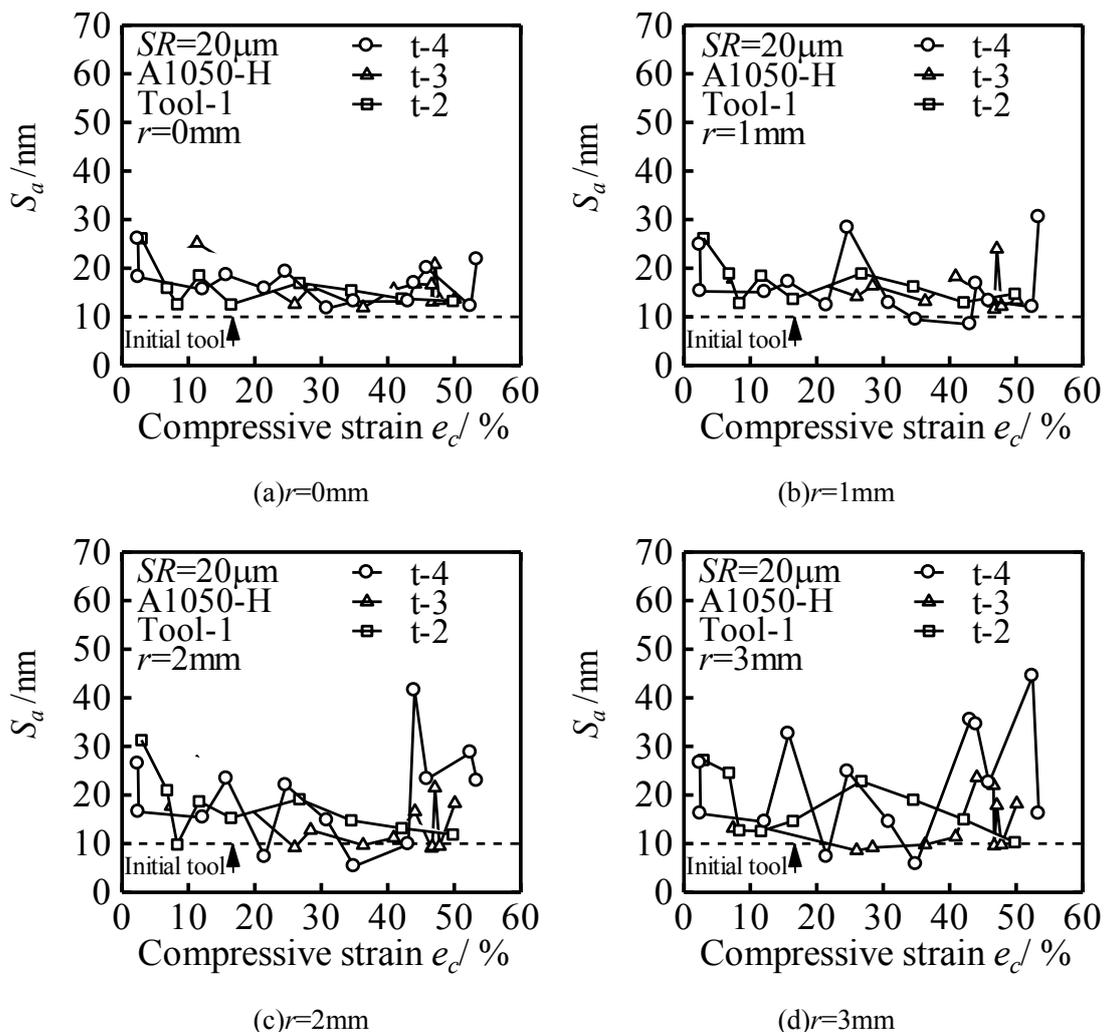


Fig.3.60 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係(A1050-H, Tool-1)

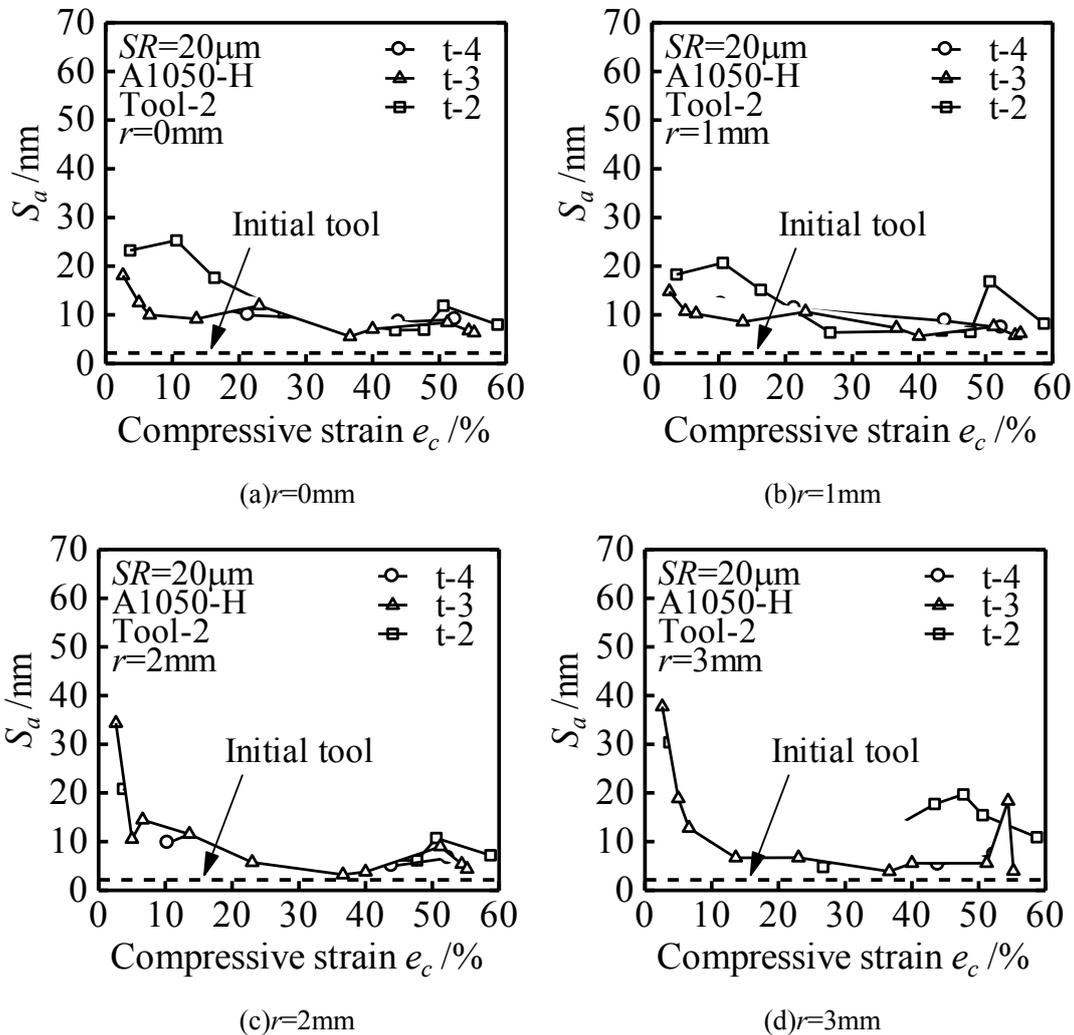


Fig.3.61 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係(A1050-H, Tool-2)

3.6 工具表面膜種の影響

工具表面膜種の影響を調べるため、Tool-1 において DLC-A, DLC-B, t-3 の比較を行った。

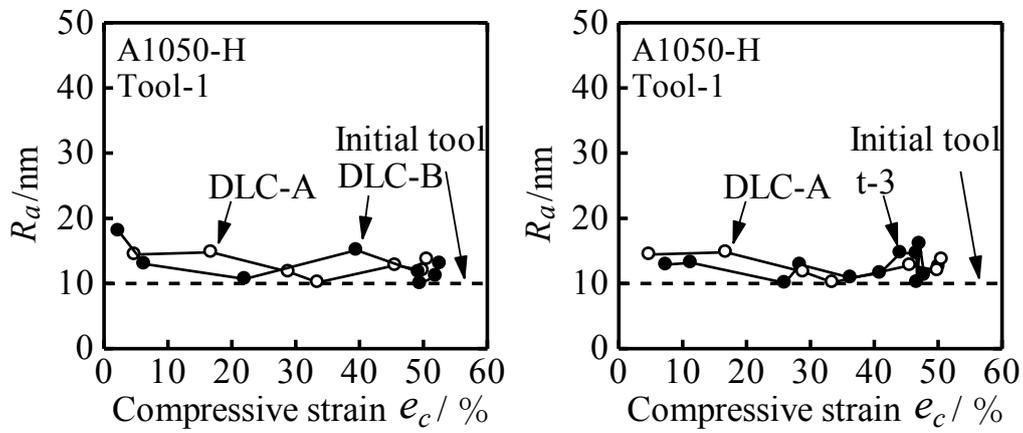
3.6.1 圧縮率と表面粗さの関係

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。DLC-A と DLC-B で R_a に大きな違いはなく、DLC-A と t-3 でも R_a に大きな違いは見られない。

Fig.3.63 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-B は DLC-A に比べて、DLC-A は t-3 に比べて平均面圧 p_{mean} が大きい傾向がある。高圧縮率では t-3 が潤滑状態が良く、次に DLC-A, DLC-B の順であることがわかる。

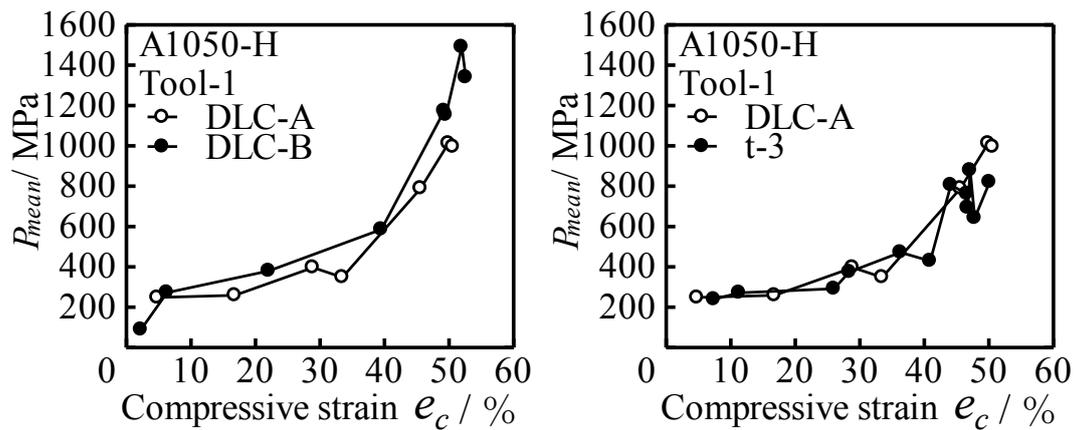
Fig.3.64 に各条件での荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係を示す。DLC-B は DLC-A に比

べて、DLC-A は t-3 に比べて僅かに P が大きい傾向がある。



(a) DLC-A, DLC-B

(b) DLC-A, t-3

Fig.3.62 算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H)

(a) DLC-A, DLC-B

(b) DLC-A, t-3

Fig.3.63 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H)

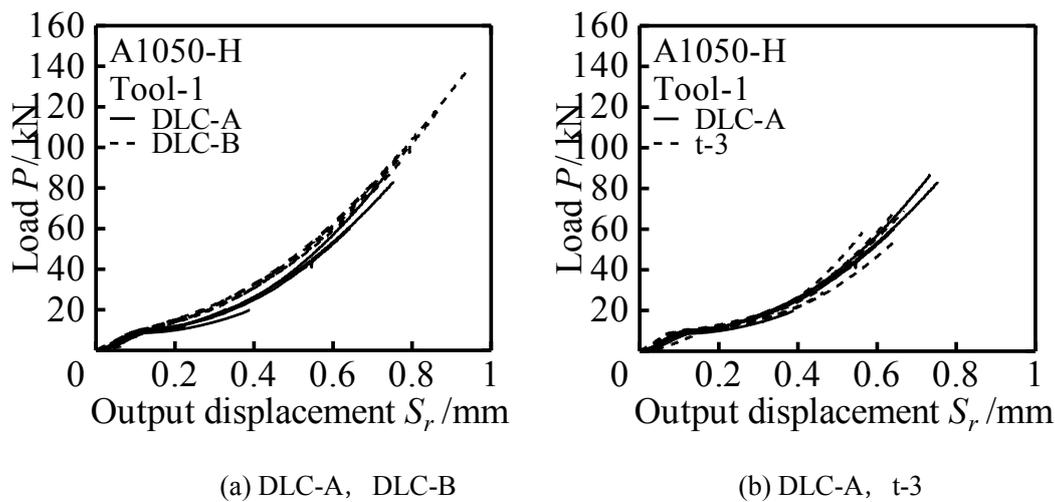


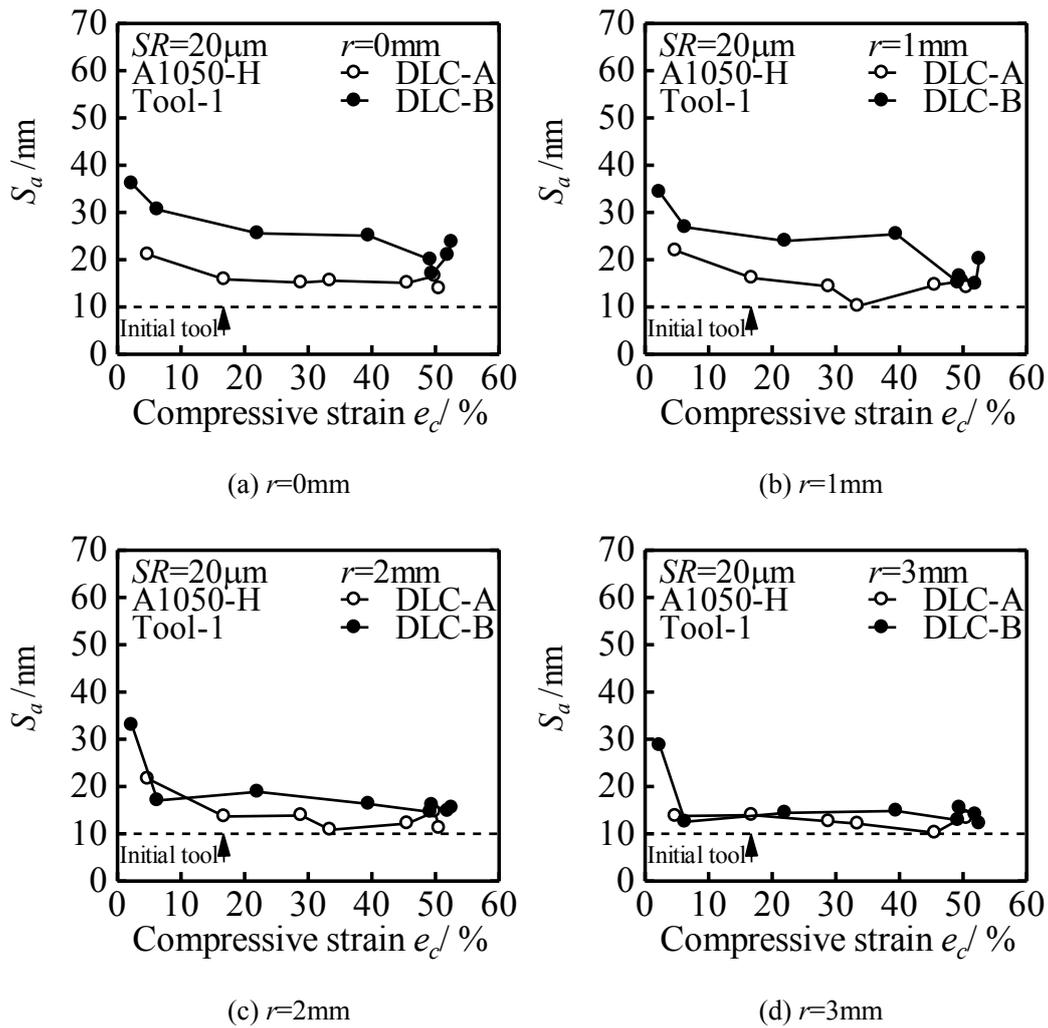
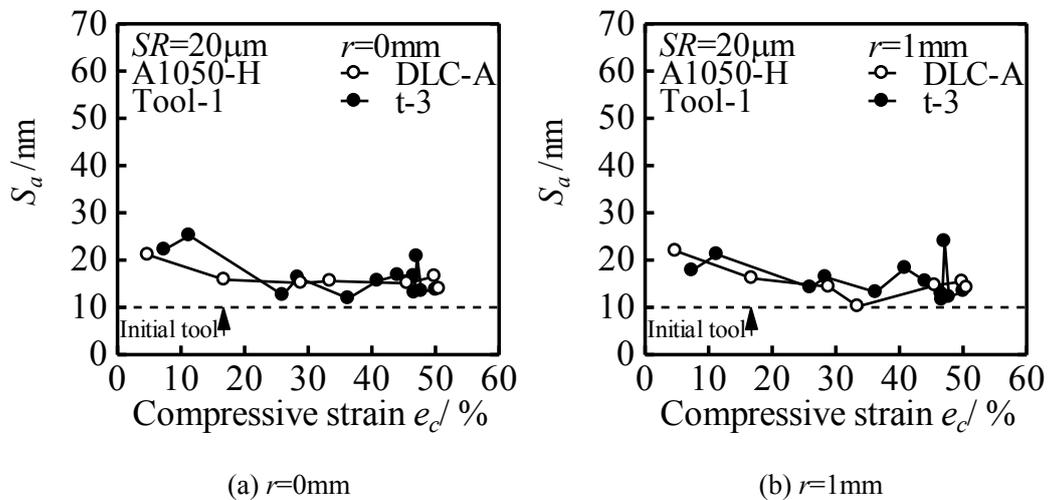
Fig.3.64 荷重 P とレコーダ出力変位 S_r の関係(Tool-1, A1050-H)

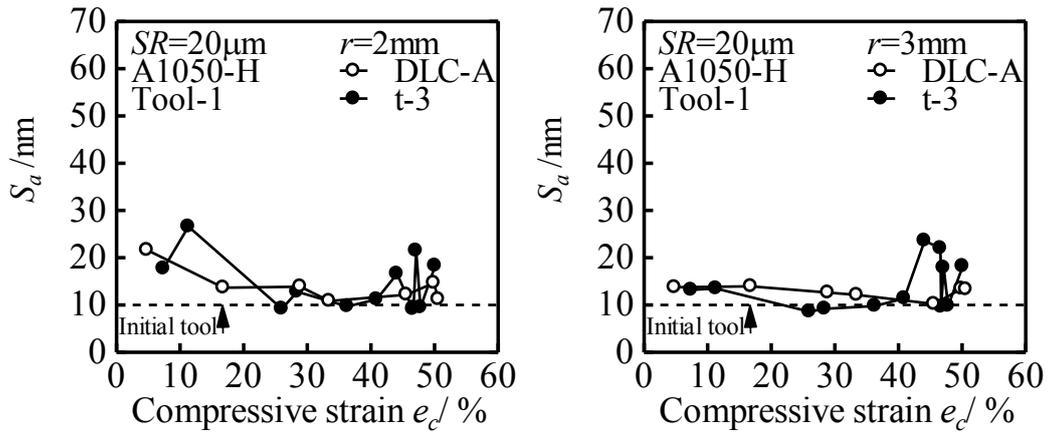
3.6.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価

Fig.3.65 に DLC-A, DLC-B, 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。 $r=0\text{mm}$, 1mm の中心部の低圧縮率では DLC-B の方が DLC-A に比べて S_a が大きい傾向が見られる。 $r=2\text{mm}$, 3mm の外周部では DLC-B は DLC-A と同程度まで平滑化が進む。

Fig.3.66 に DLC-A, t-3, 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。

Tool-1, H 材において硬度が高い DLC-A では、高圧縮率においても工具表面状態の悪化がほとんどなく平滑化が進む。硬度は低いが高密着性が高くコーティング表面粗さが大きい DLC-B は、低圧縮率では他の膜種に比べて平滑化が進まないが、高圧縮率の外周部において DLC-A や t-3 と同程度に平滑化が進む。これは、コーティング表面の S_a が大きくても材料流動によるしごき効果により平滑化が進んだと考えられる。t-3 (カーボン蒸着膜) では、高圧縮率で工具表面状態の悪化が観察されたが、工具表面状態の影響のない箇所では DLC-A と同程度の平滑度が得られる。

Fig.3.65 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1 , A1050-H)Fig.3.66 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H)

(c) $r=2$ mm(d) $r=3$ mmFig.3.66 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, 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⁽³⁵⁾によって提唱された幾何学の概念であり、ラテン語の *fractus* が語源となっている。これは特徴的な長さを持たないような図形や構造、現象などの総称のことである。特徴的な長さを持たない図形とは、言い換えれば近似が難しい図形のことである。例えば車を直方体で近似できるようにフラクタル図形を何か単純な図形で近似することは出来ない。つまりここで言う特徴的な長さとは、その対象に付随する代表的な長さを指す。フラクタルの概念の基本は、「きわめて複雑な図形であってもそれはごく単純な図形の繰り返しによって出来上がっているとみなす」ことにある。

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

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

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

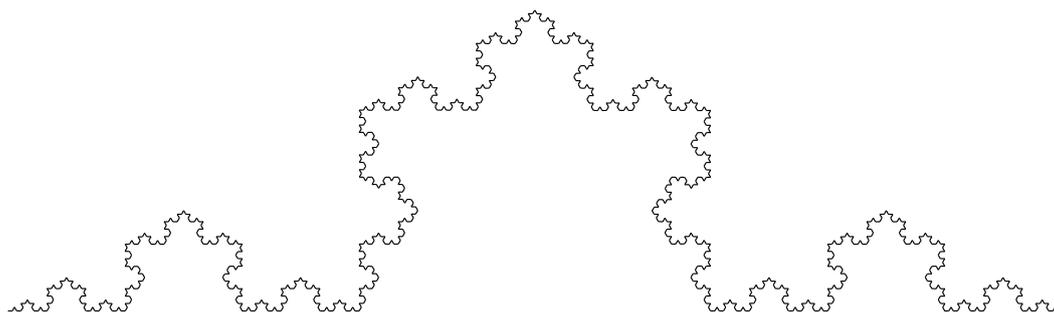


Fig. 4.1 コッホ曲線

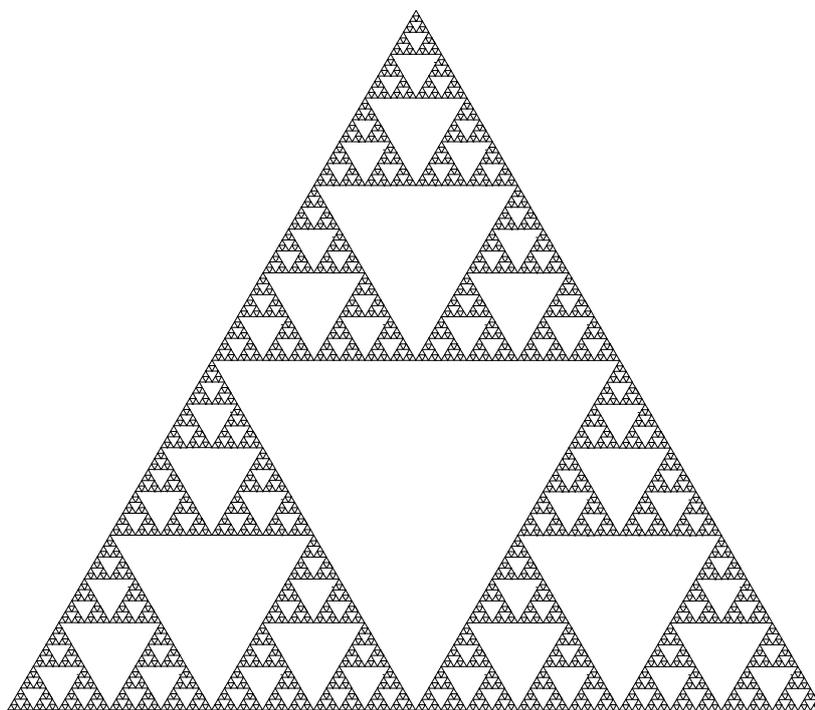


Fig. 4.2 シルピンスキーのギャスケット



Fig. 4.3 カントール集合

4.2 フラクタル次元の決定法

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

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

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

4.2.1 零点集合次元

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

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

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

ここで、 L は長さ、 A は面積、 V は体積である。 D 次元測度を持つフラクタル物理量を X とするとき式(4.1)は次式のように一般化できる⁽²⁷⁾。

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

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

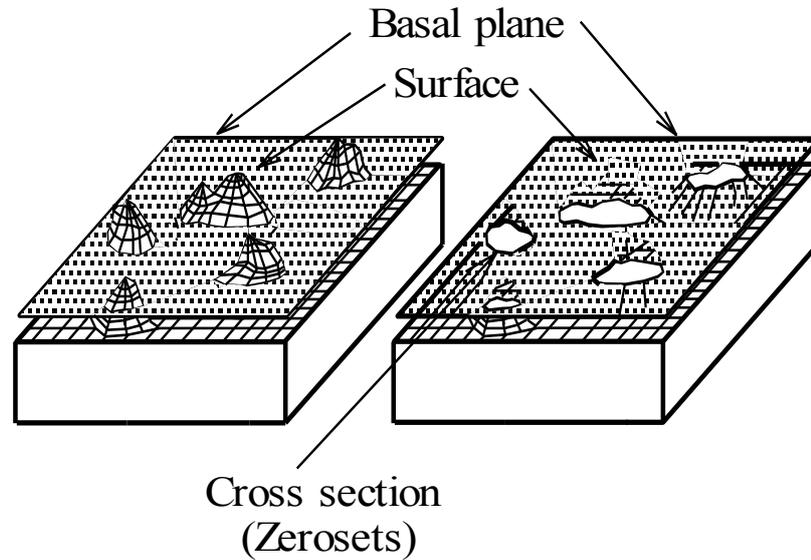


Fig. 4.4 零点集合法の概要

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⁽³¹⁾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、

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.4)$$

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、

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

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、

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} a(n) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (4.6)$$

$$B_k = \sum_{n=0}^{N-1} b(n) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (4.7)$$

とおくと

$$X_k = A_k - jB_k$$

と書け、 A_k 、 B_k と X_k の関係は、

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

となる。 X_k の2乗値がパワースペクトルである。

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

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

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

ここで、 $X(t)$ をfBm関数とすると、適当にスケーリングされた関数

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

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

$$S_Y(f) = \frac{1}{r^{2H}} S_X(rf) \quad (4.10)$$

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。

$$F_Y(t, T) = \int_0^T \int_0^T Y(t) Y^*(t') e^{-j2\pi f(t-t')} dt dt' \quad (4.11)$$

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

$$KGD = \frac{1}{r^{\beta+1}} \left(\int_{-T}^T \dot{f}(t) dt \right) \quad (4.12)$$

である. よって, $Y(t, T)$ のスペクトル密度は

$$S_{GD} = \frac{1}{r^{\beta+1}} \left[\int_{-T}^T \dot{f}(t) dt \right]^2 \quad (4.13)$$

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.

$$S_{GD} = \frac{1}{r^{\beta+1}} S_{\dot{f}} \quad (4.14)$$

Y は X に適当なスケールリングを施したものであるため, 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,

$$S_{GD} = \frac{1}{r^{\beta+1}} S_{\dot{f}} \quad (4.15)$$

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

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

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.

$$\begin{aligned} D_{PS} &= 2, & 0 \leq \beta < 1 \\ D_{PS} &= E + \frac{3-\beta}{2}, & 1 \leq \beta \leq 3 \\ D_{PS} &= 1, & 3 < \beta \end{aligned} \quad (4.19)$$

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。

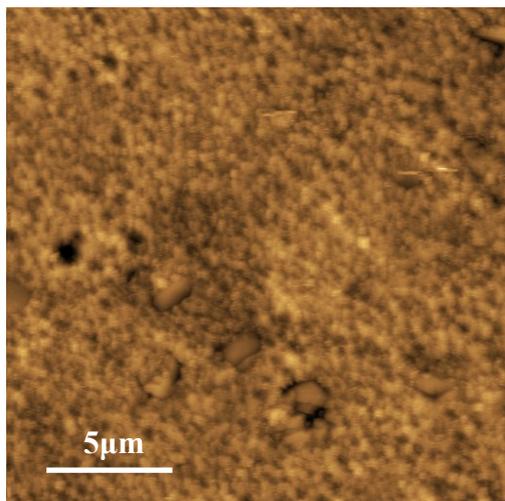
零点集合カット面をつくるには、色調が 256 階調で表されているグレー画像をしきい値で 2 値化しなくてはならない。この 2 値化のために AFM 画像の最大高さからのカット量を相対カット量として表すことにした。相対カット量 δ は次式で表される。

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

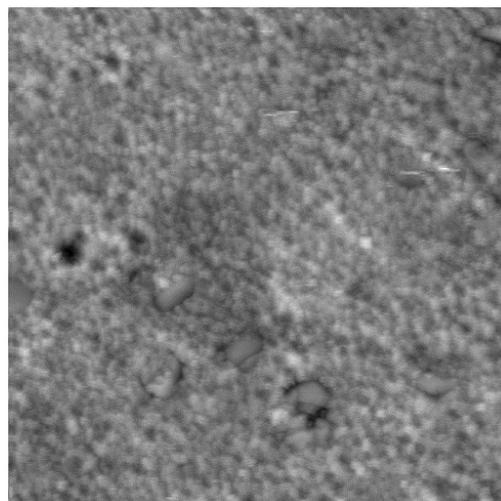
本研究では画像の 2 値化の相対カット量を 18%, 34%, 49%, 65%, 80% と固定し、変化させる。

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

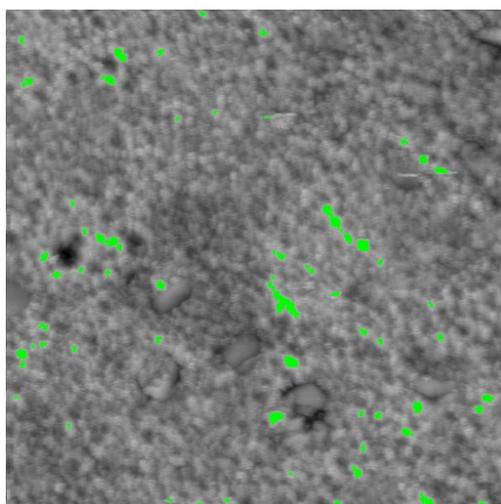
(c) 2 値化画像($\delta=34\%$)

Fig.4.5 零点集合法における画像処理の流れ
($e_c=40\%$, $SR=20\mu\text{m}$, DLC-B, Tool-1, A1050-H)

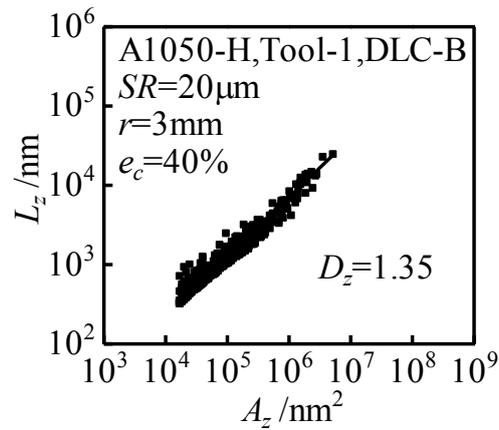
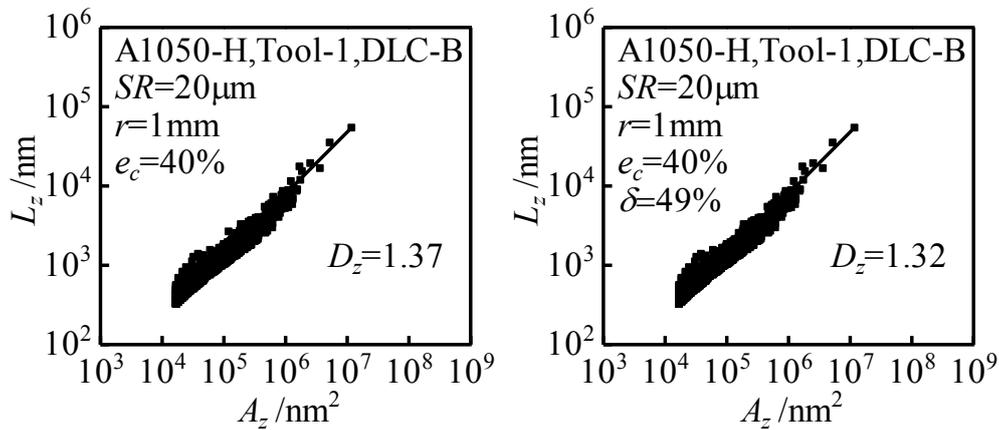
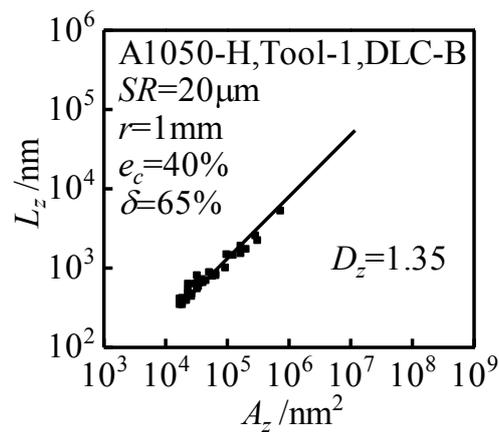
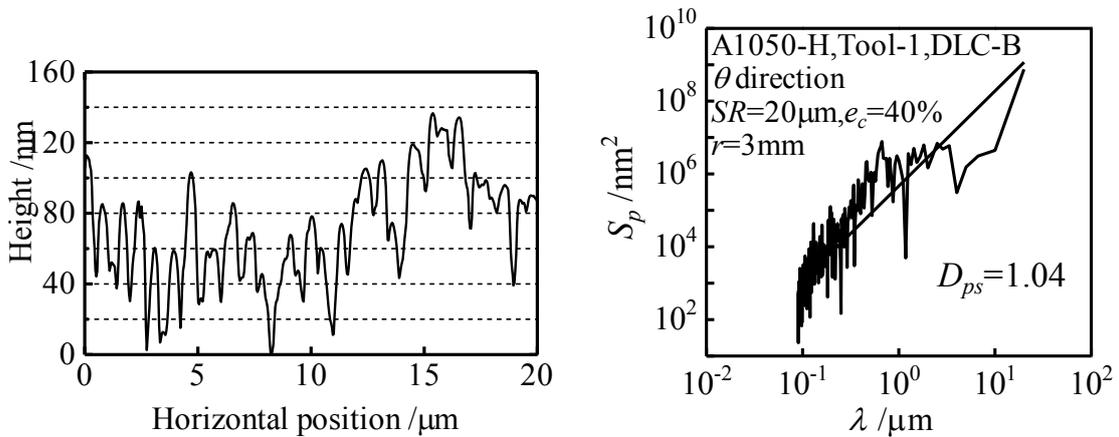
Fig.4.6 周囲長 L_z と面積 A_z の関係(a) $\delta=18\%,34\%,49\%,65\%,80\%$ (b) $\delta=49\%$ (c) $\delta=65\%$

Fig.4.7 相対カット量の違いによる比較 (DLC-B, Tool-1, 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 Tool-1($R_a=10\text{nm}$), t-4($t=100\text{nm}$), 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。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.4.9 に零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。どの圧縮率でも測定箇所による違いはあまり見られず、高圧縮率で僅かに D_Z が大きくなる傾向があるが、はっきりとした規則性は見られない。

Fig.4.10 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 が小さいと D_Z のばらつきは大きくなる傾向があるが、はっきりとした規則性は見られない。

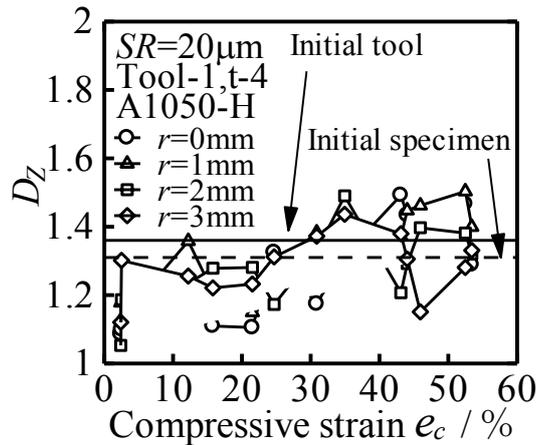


Fig.4.9 D_Z と圧縮率 e_c の関係(Tool-1, t-4, A1050-H)

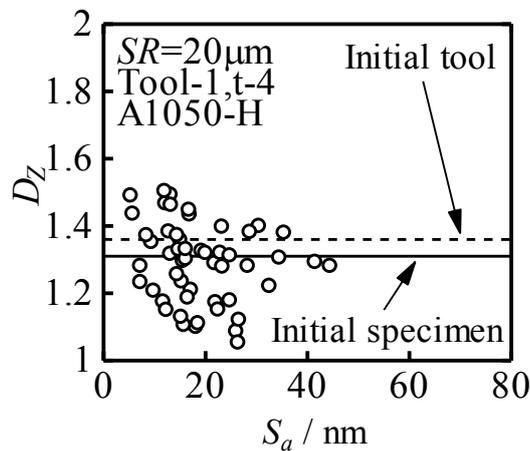


Fig.4.10 D_Z と算術平均面粗さ S_a の関係(Tool-1, t-4, A1050-H)

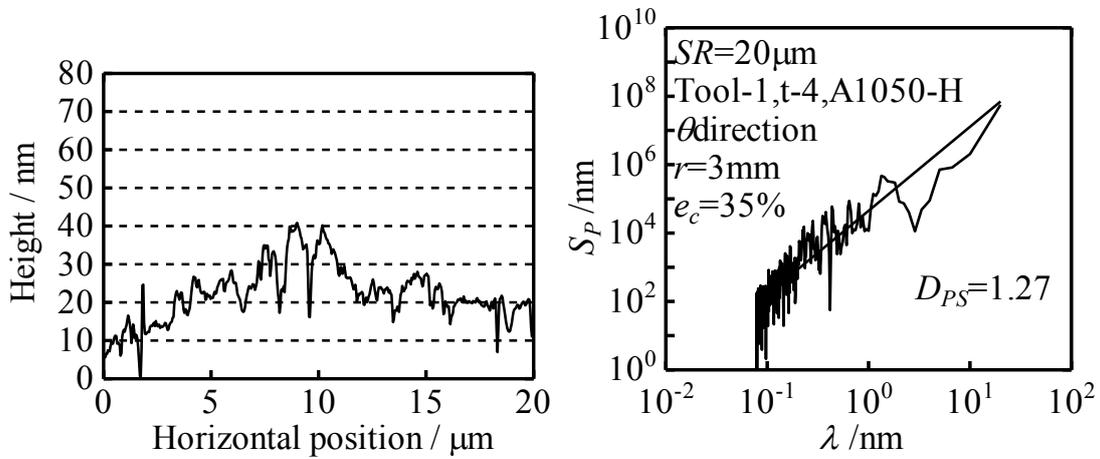
4.4.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

次に、パワースペクトル法によって表面細部の凹凸形状について検討する。Fig. 4.11 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-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. 4.12 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。低圧縮率では方向、測定箇所による違いは見られず、高圧縮率では D_{PS} のばらつきが大きくなり圧縮後試験片の表面形状が違っていることが考えられるが、表面粗さとの関係性は見られない。

Fig.4.13 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 D_{PS} が大きく、 S_a が大きいと D_{PS} は小さくな

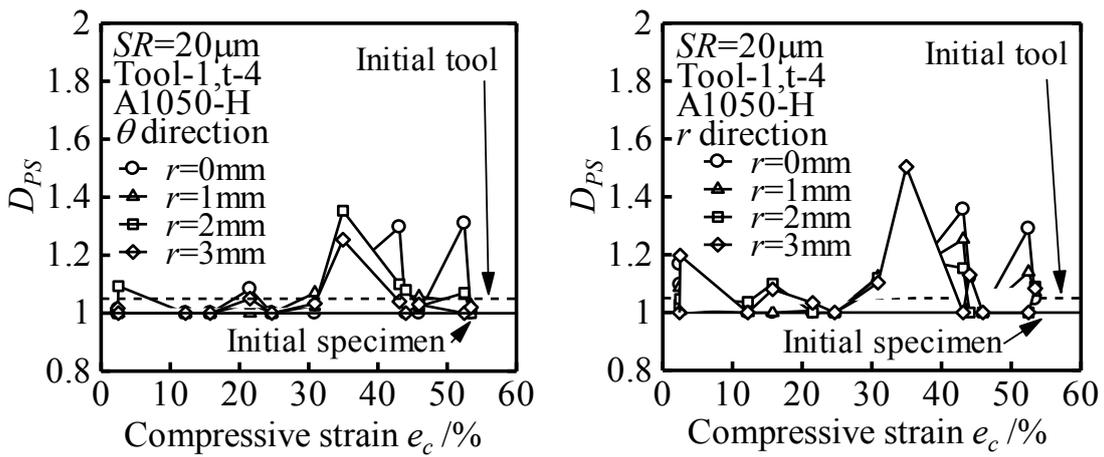
る傾向が見られる。



(a)断面曲線

(b)パワースペクトル密度 S_P と波長 λ の関係

Fig.4.11 断面曲線および FFT 解析結果(Tool-1, t-4, A1050-H, $e_c=35\%$)



(a) θ 方向

(b) r 方向

Fig.4.12 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係(Tool-1, t-4, A1050-H)

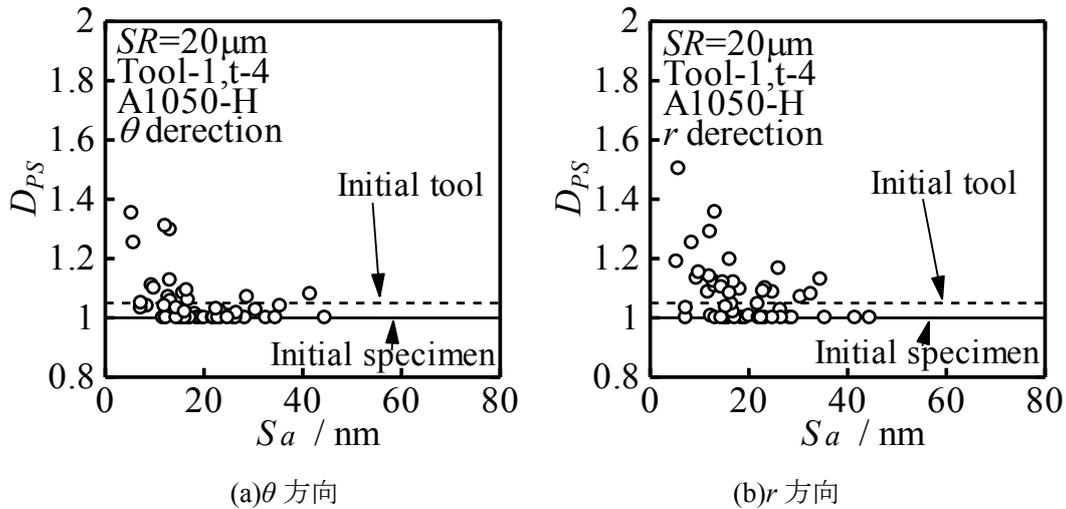


Fig.4.13 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係(Tool-1, t-4, A1050-H)

4.5 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), t-4($t=100\text{nm}$), 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。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.4.14 に零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。計測箇所による違いはあまり見られず、高圧縮率で D_Z は小さくなる傾向がある。

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。どの S_a でもばらつきが大きく、はっきりとした規則性は見られない。

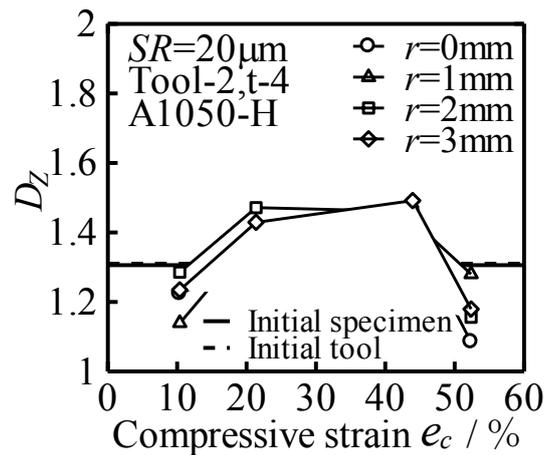


Fig.4.14 D_Z と圧縮率 e_c の関係(Tool-2, t-4, A1050-H)

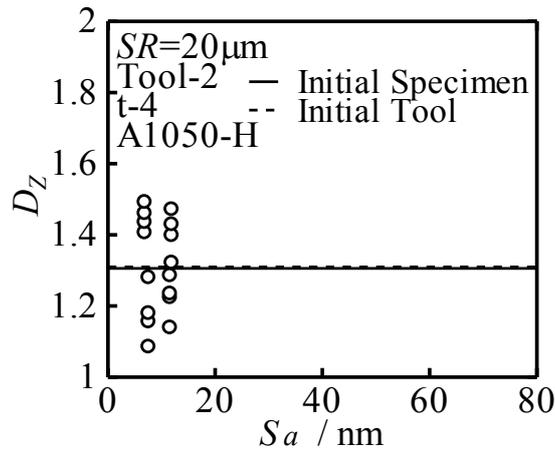


Fig.4.15 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係(Tool-2, t-4, A1050-H)

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

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-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. 4.17 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. 低圧縮率では方向, 測定箇所による違いはあまり見られない. 圧縮率 $e_c=45\%$ 付近の r 方向では外周部で初期工具の D_{PS} に近づく傾向が見られる. 圧縮率 50%以上では測定箇所による違いは見られない.

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 方向ともにどの S_a でもばらつきが大きく, はっきりとした規則性は見られない.

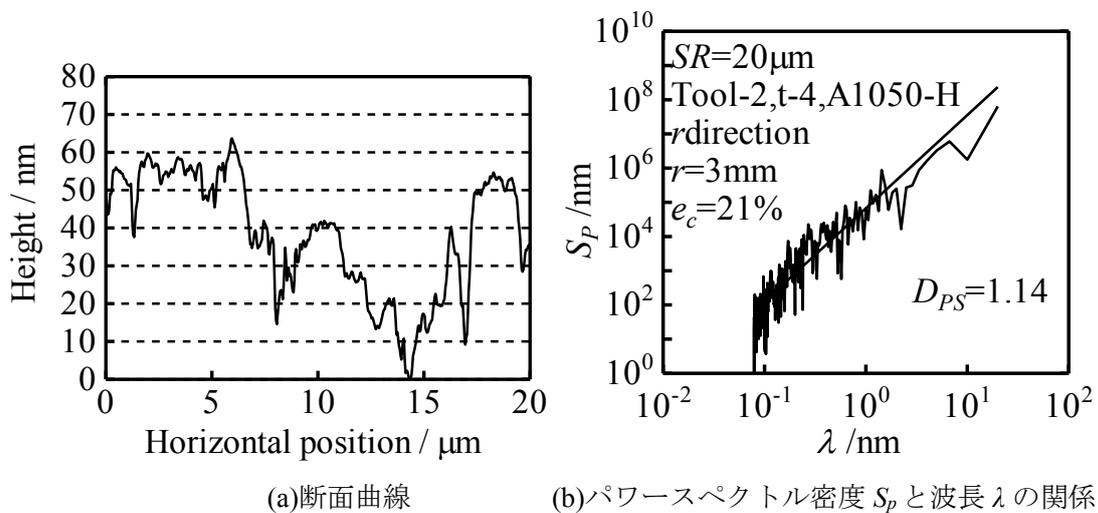
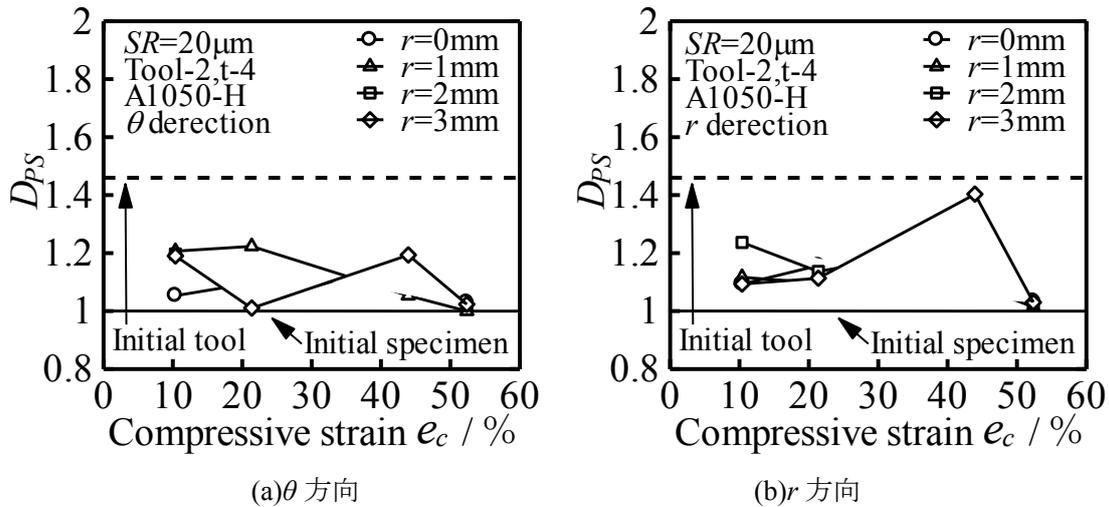
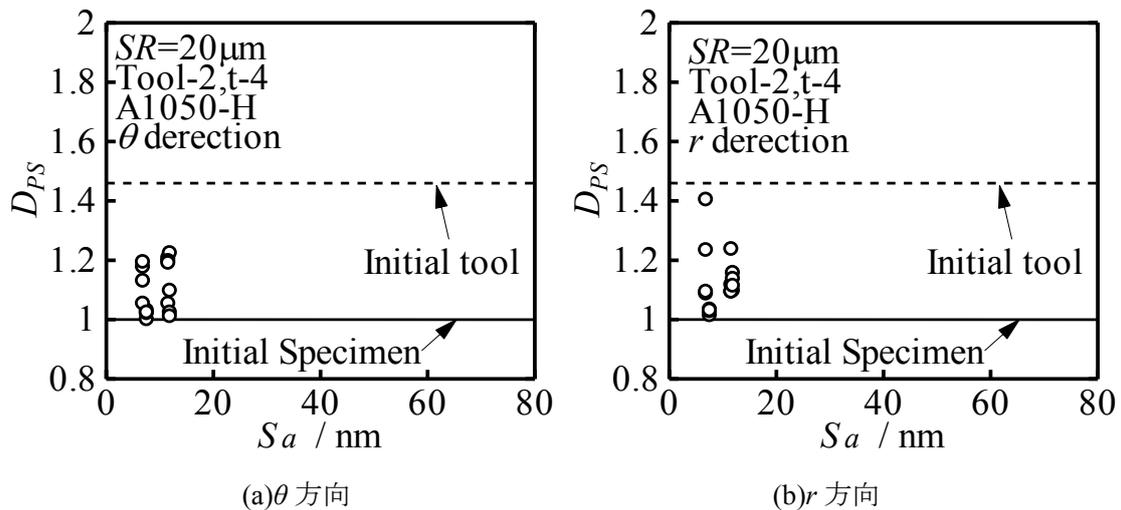


Fig.4.16 断面曲線および FFT 解析結果(Tool-2, t-4, A1050-H, $e_c=21\%$)

Fig.4.17 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, t-4, A1050-H)Fig.4.18 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-2, t-4, A1050-H)

4.6 DLC-B 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

4.6.1 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。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.4.19 に零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率、測定箇所による違いはあまり見られない。

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。初期試験片の平均の 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。

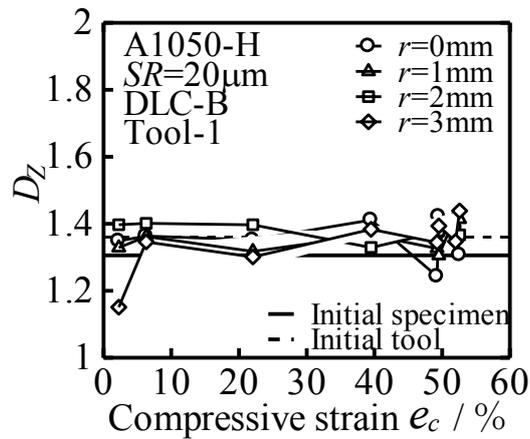


Fig.4.19 D_Z と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)

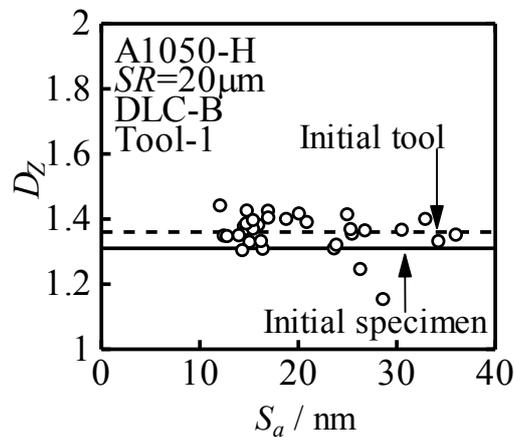


Fig.4.20 D_Z と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)

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

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. 4.21 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-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. 4.22 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 1~1.2 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 が小さいとばらつきが大きいが、 S_a が大きいと D_{PS} は小さい傾向が見られる。

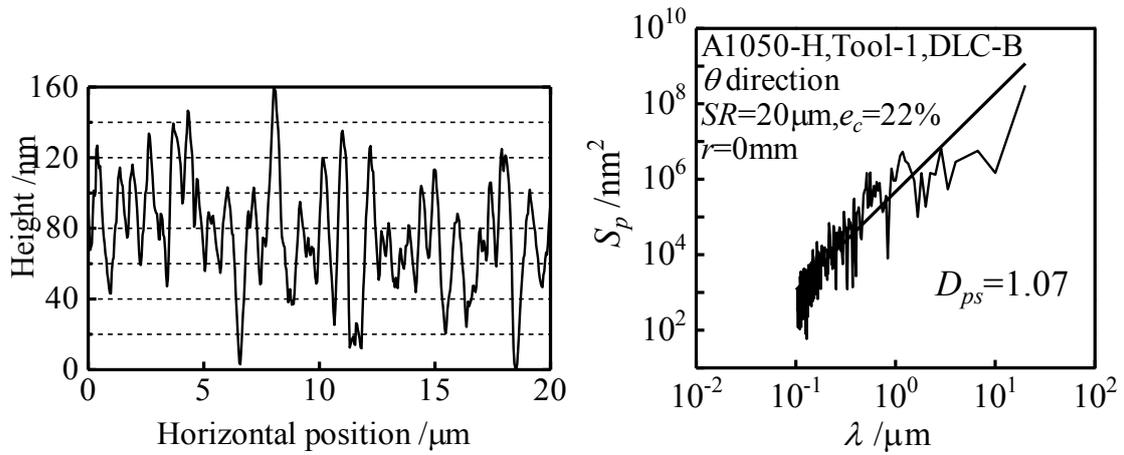
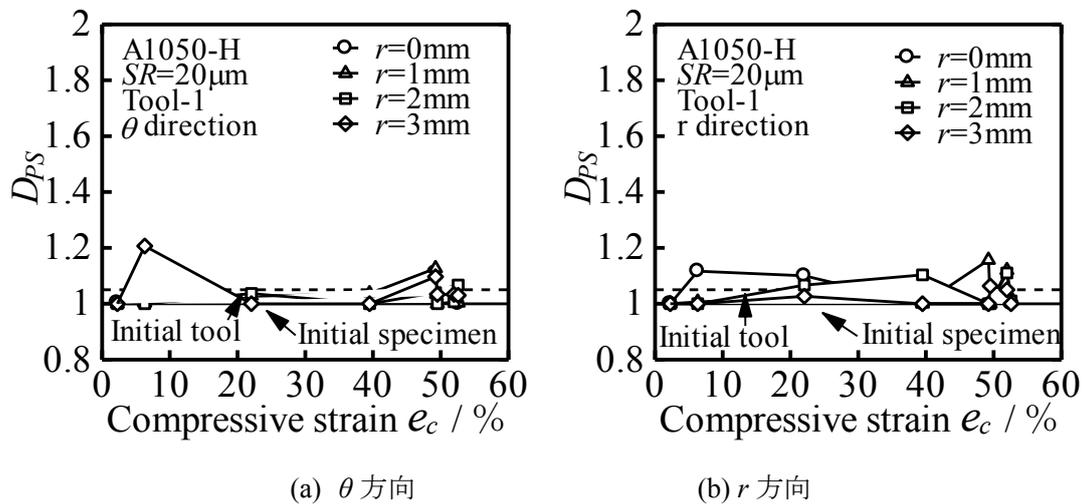


Fig.4.21 断面曲線およびFFT解析結果 ($e_c=22\%$, $r=0\text{mm}$, Tool-1, DLC-B, A1050-H)



(a) θ 方向

(b) r 方向

Fig.4.22 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)

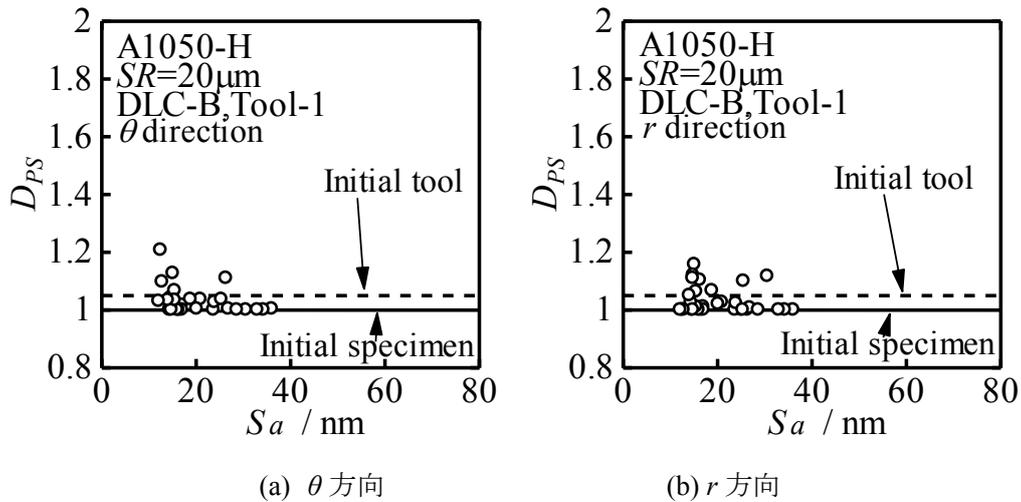


Fig.4.23 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-1, DLC-B, A1050-H)

4.7 カーボン蒸着膜厚の影響

4.7.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

Fig.4.24 に Tool-1 の測定箇所ごとの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. いずれの測定箇所でも t-2 と t-3 に大きな違いは見られず, t-4 ではばらつきは大きく, D_Z は小さい傾向がある.

Fig.4.25 に Tool-2 の測定箇所ごとの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. いずれの測定箇所も膜厚による違いはあまり見られず, 規則性も見られない.

Fig.4.26 に Tool-1 の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. t-2 と t-3 に大きな違いは見られず, t-4 ではばらつきが大きく, D_Z は初期試験片よりも小さい値をとる傾向がある.

Fig.4.27 に Tool-2 の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. t-2, t-3, t-4 の順にばらつきが大きくなり, t-4 では D_Z が初期試験片よりも小さい値をとる傾向がある.

Tool-1, Tool-2 どちらも t-4 の D_Z の値は初期試験片よりも小さい値をとる場合がある.

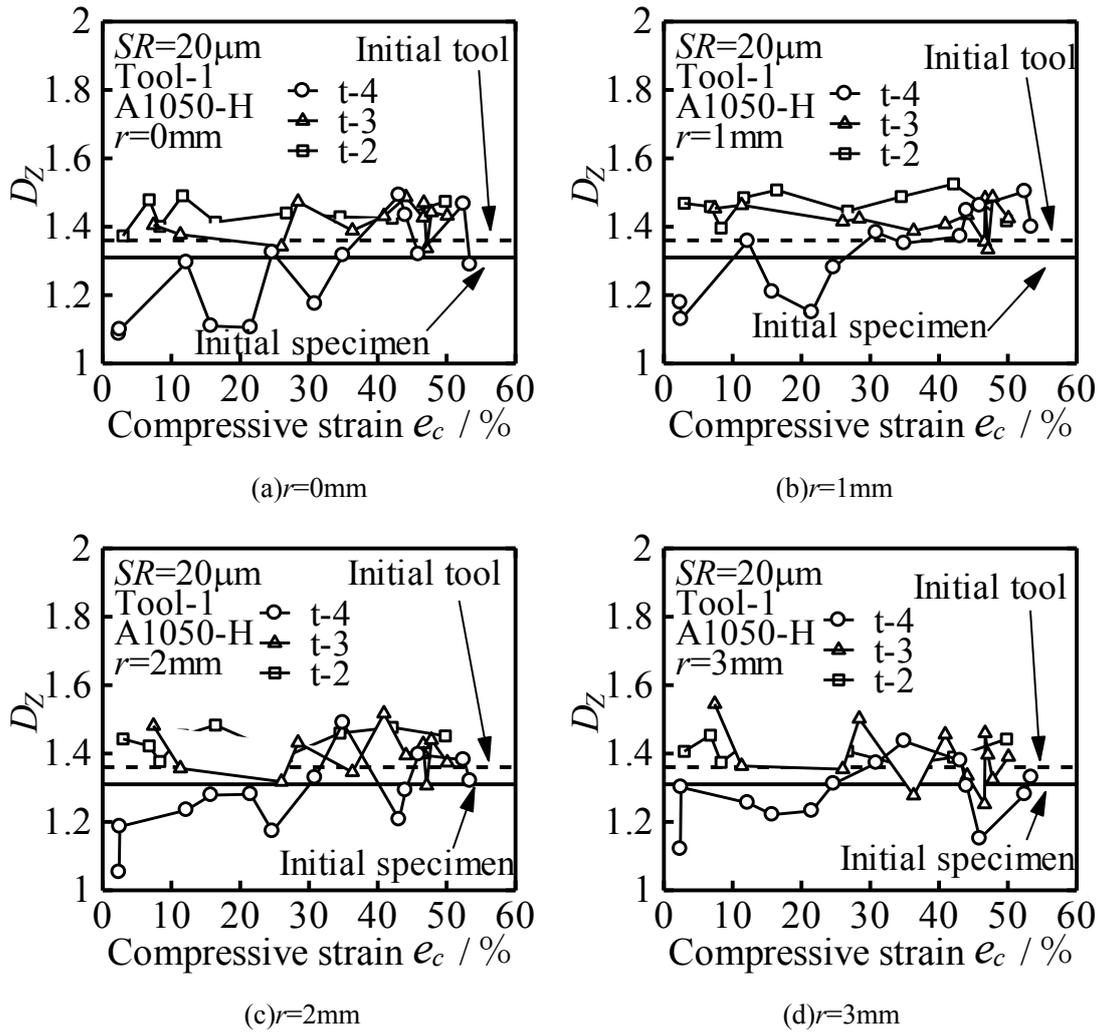


Fig.4.24 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H)

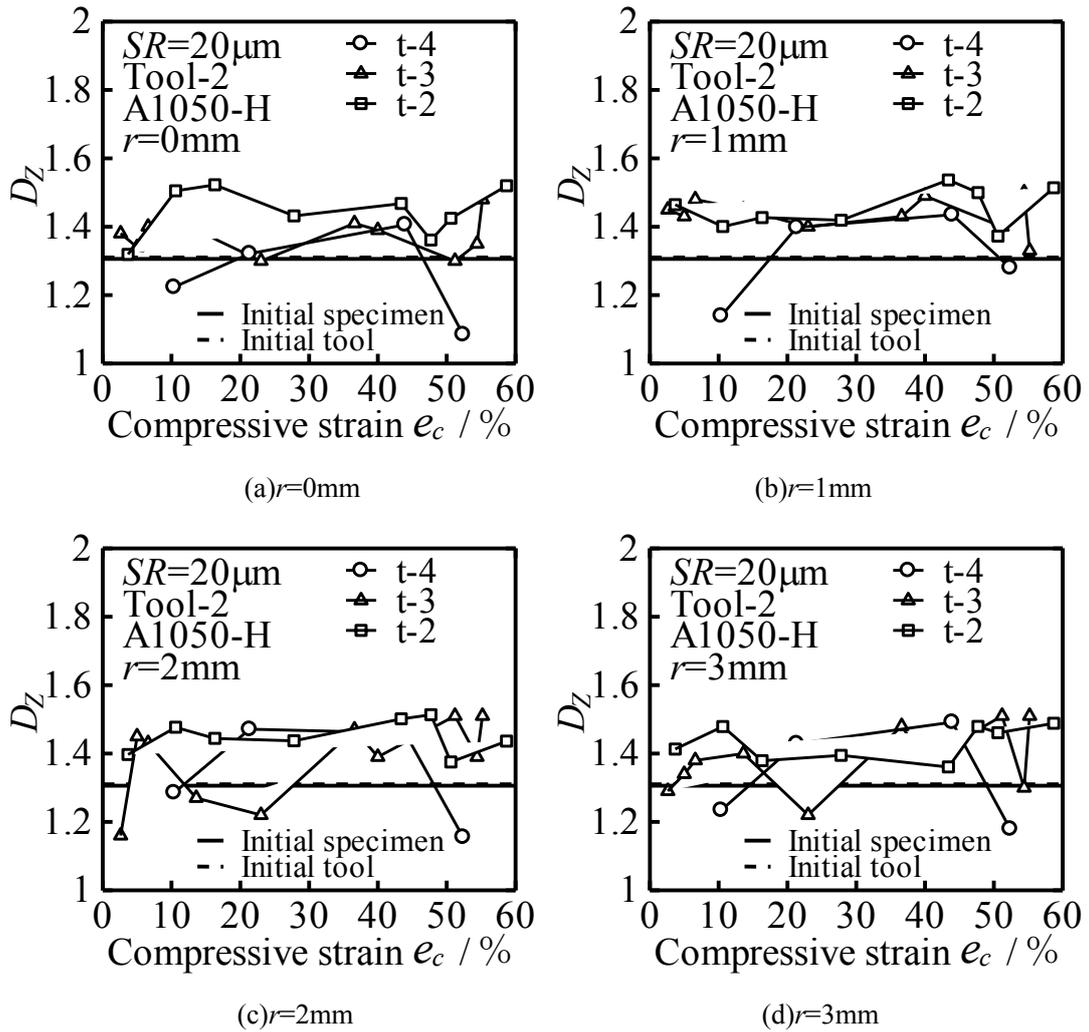


Fig.4.25 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, A1050-H)

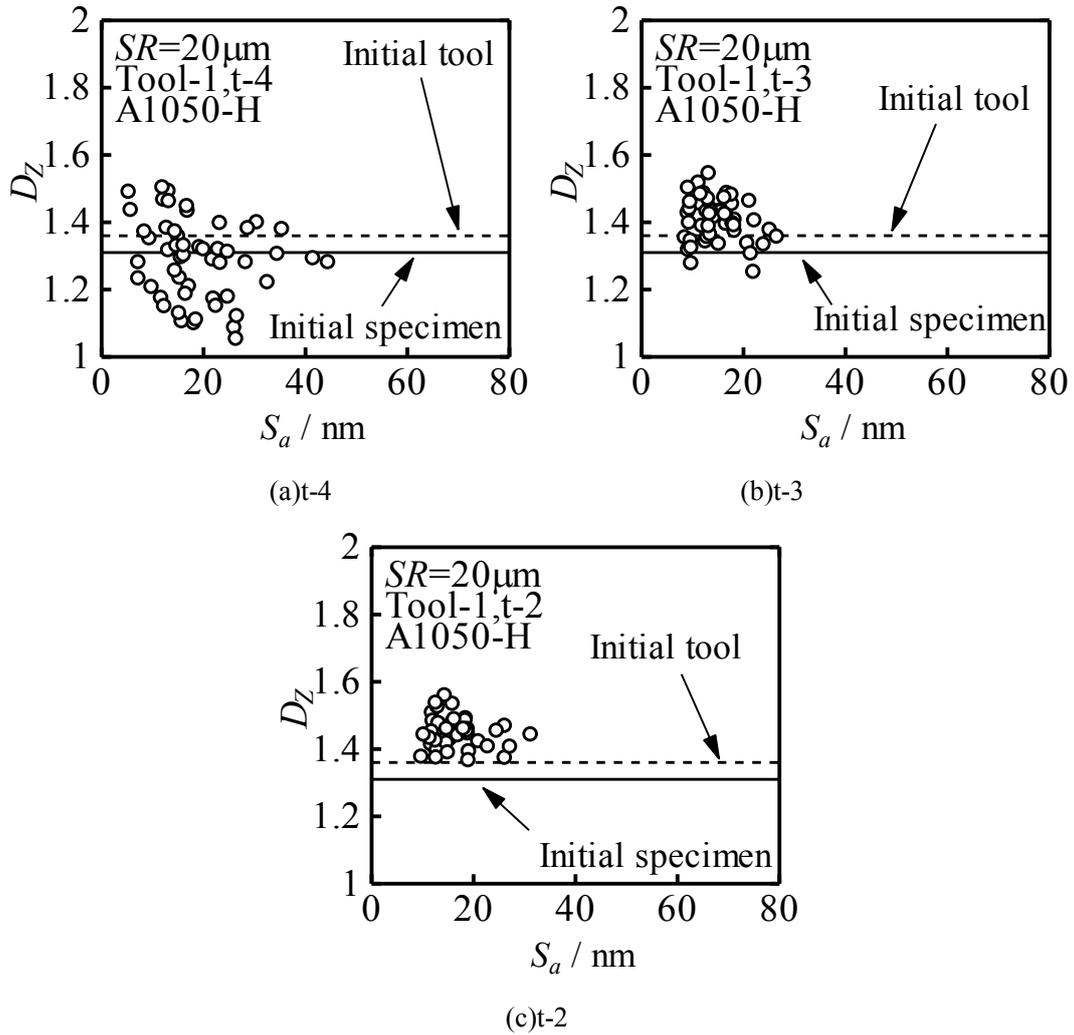


Fig.4.26 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係(Tool-1, A1050-H)

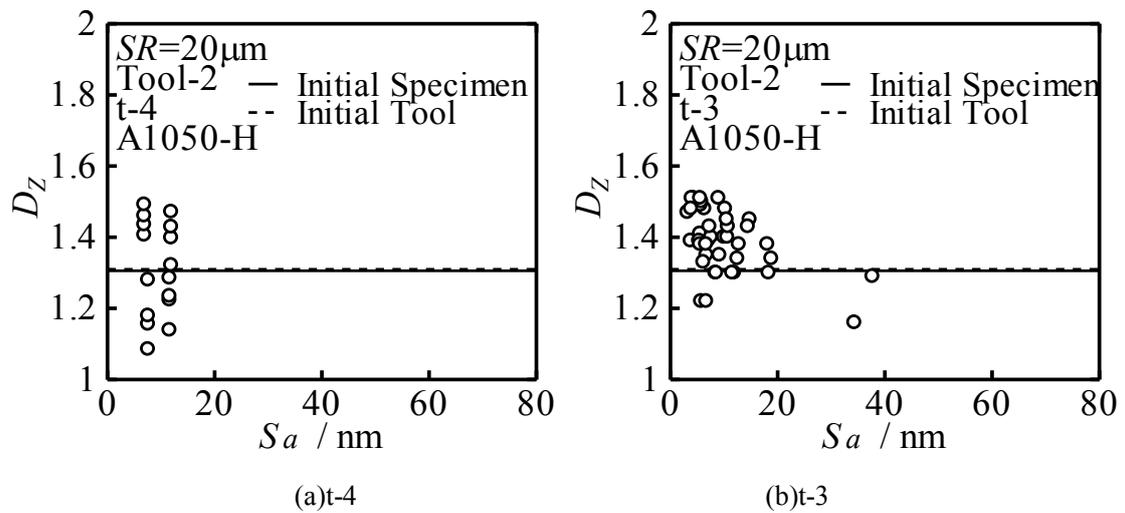
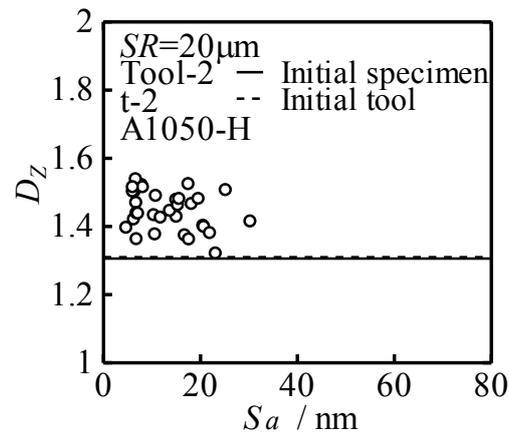


Fig.4.27 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係(Tool-2, A1050-H)



(c)t-2

Fig.4.27 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係(Tool-2, A1050-H)

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. 4.28, 29 に Tool-1 の計測箇所ごとの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. 中心部において, θ 方向, r 方向ともに高圧縮率では膜厚による違いは見られないが, 低圧縮率では t-3 と t-4 に大きな違いは見られず, t-2 で D_{PS} が大きくなる傾向が見られる. 外周部において, θ 方向, r 方向ともに高圧縮率では膜厚による大きな違いは見られないが, 低圧縮率では t-2 と t-3 に大きな違いは見られず, t-4 で D_{PS} の値が小さくなる傾向が見られる.

Fig.4.30, 31 に Tool-2 の計測箇所ごとの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. θ 方向, r 方向ともにどの膜厚も D_{PS} に大きな違いは見られないが, 圧縮率 50%以上で t-2 と t-3 は D_{PS} が大きくなり初期工具と同程度になり, t-4 では小さい値をとる傾向が見られる.

Fig.4.32, 33 に Tool-1 の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. どの膜厚においても θ 方向, r 方向ともに, S_a が小さいとばらつきが大きくなり, S_a が大きいと D_{PS} は小さい傾向が見られる. t-2 と t-3 の D_{PS} に大きな違いは見られず, t-4 では小さい値をとる傾向が見られる.

Fig.4.34, 35 に Tool-2 の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. 測定方向, 膜厚による大きな違いは見られない.

Tool-1, Tool-2 ともにどの膜厚でも S_a が小さくなると D_{PS} が大きくなる傾向があることがわかる.

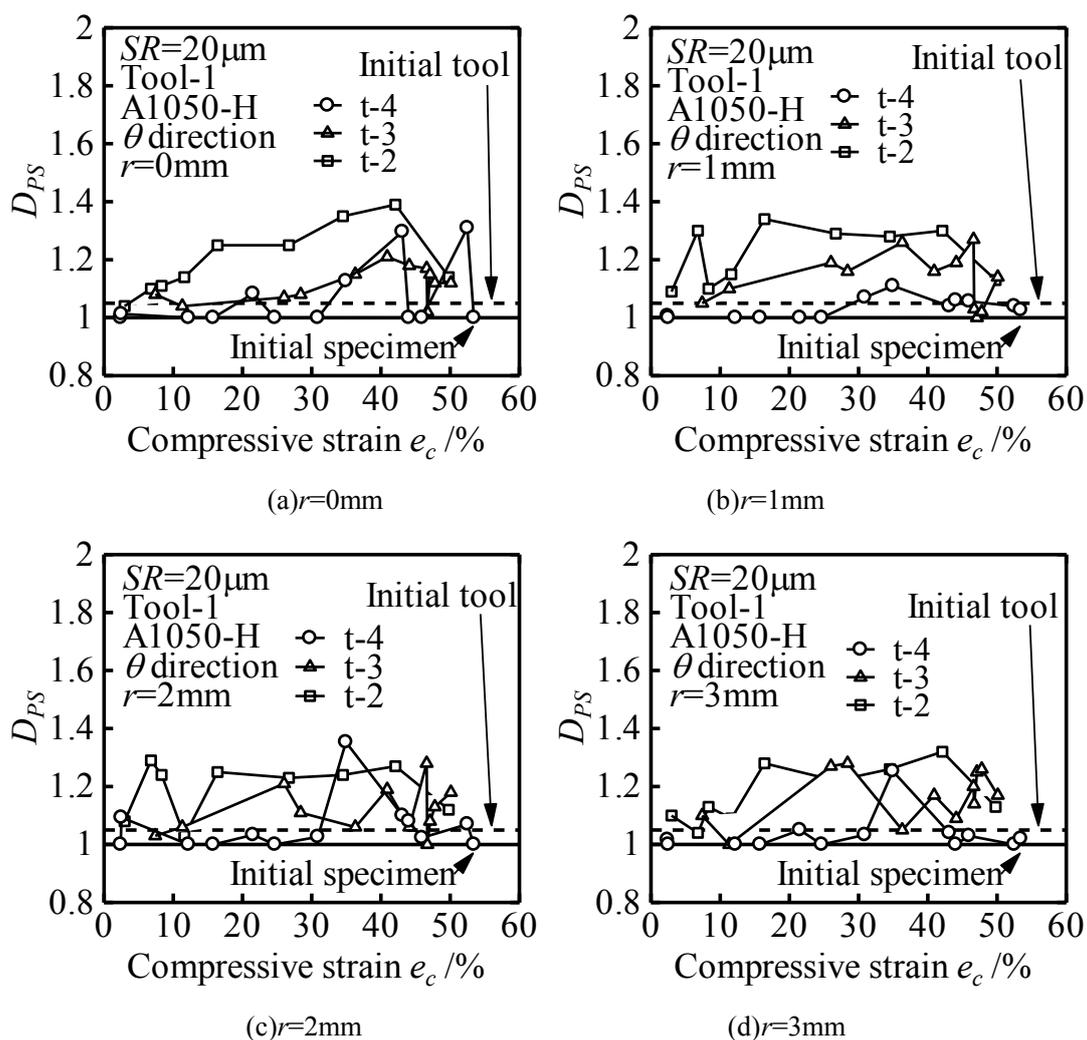


Fig.4.28 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H, θ 方向)

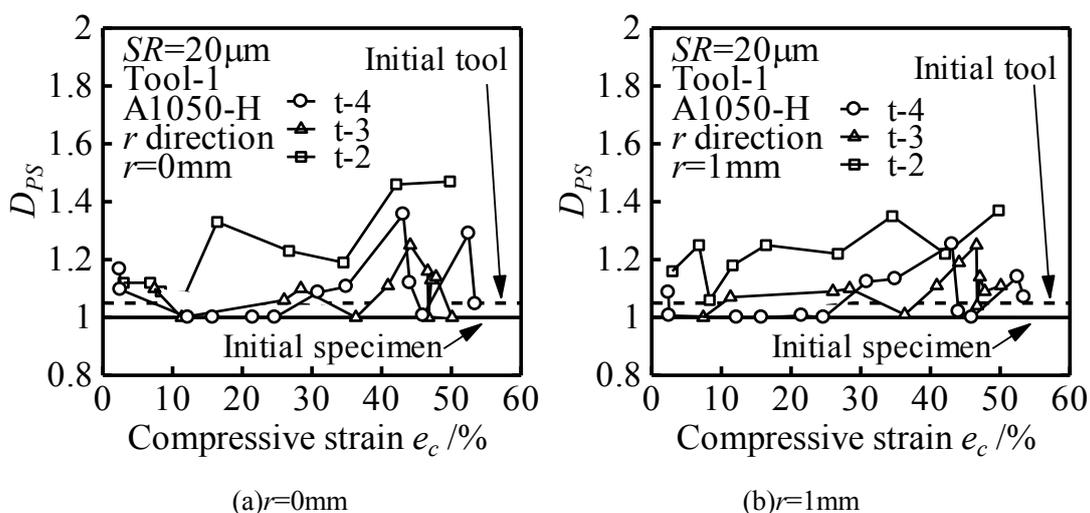
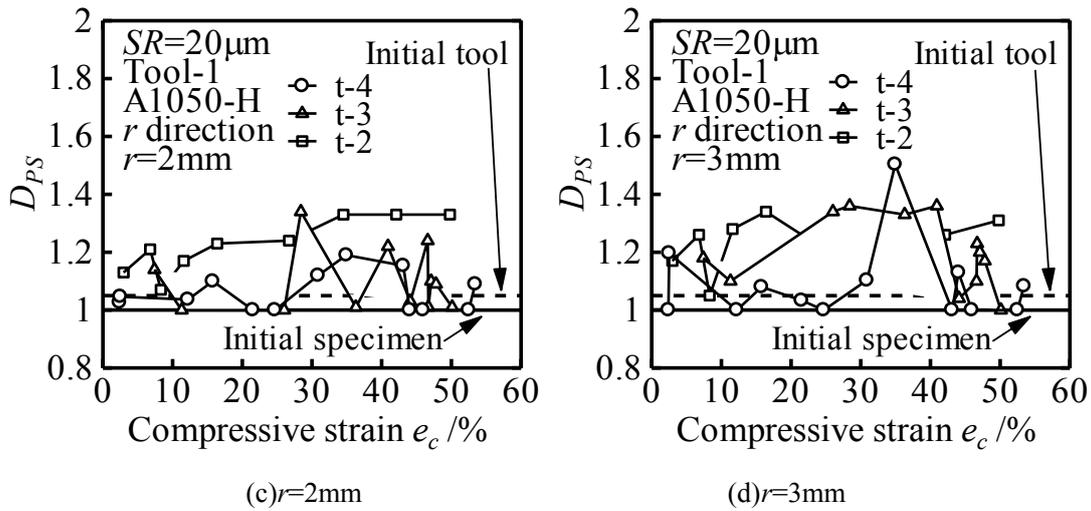
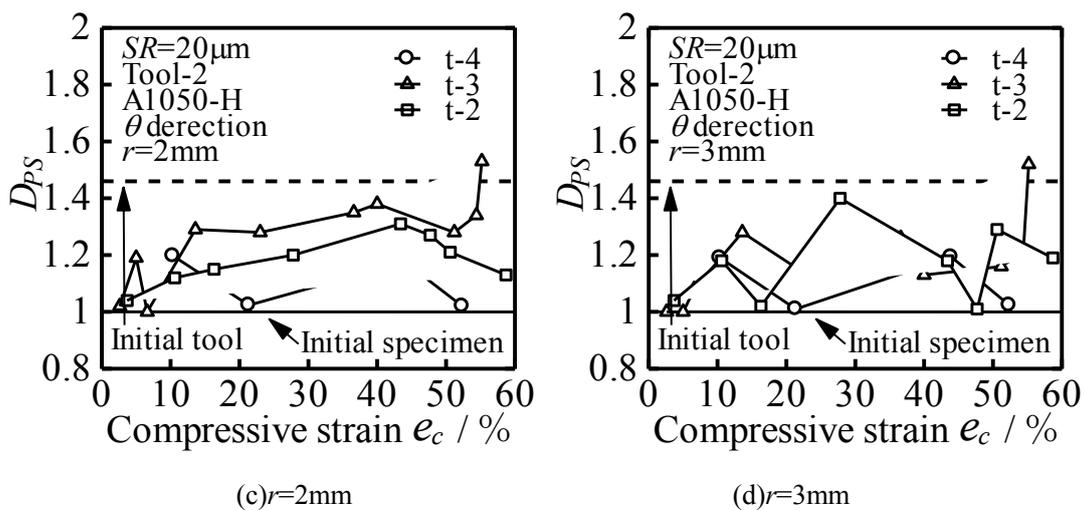
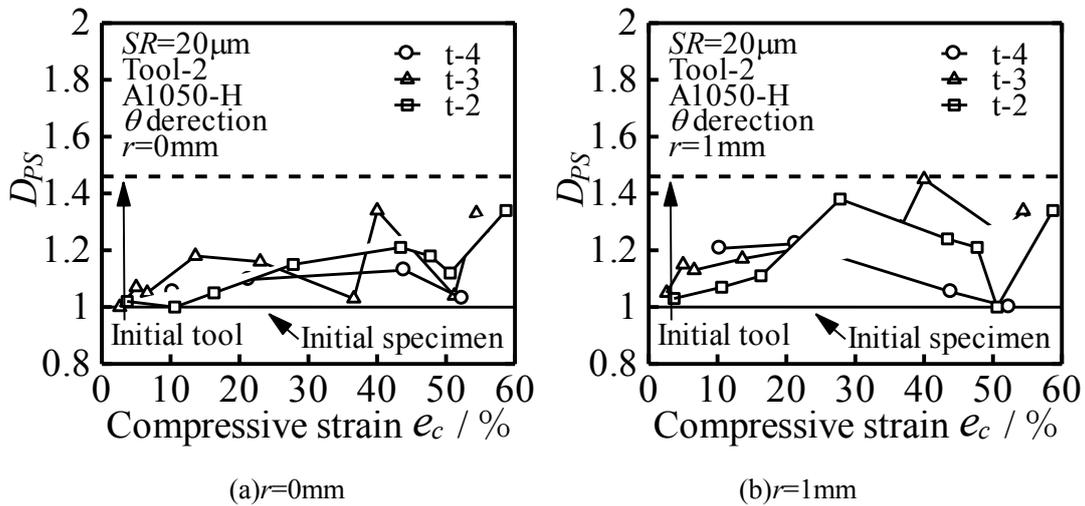


Fig.4.29 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H, r 方向)

Fig.4.29 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H, r 方向)Fig.4.30 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, A1050-H, θ 方向)

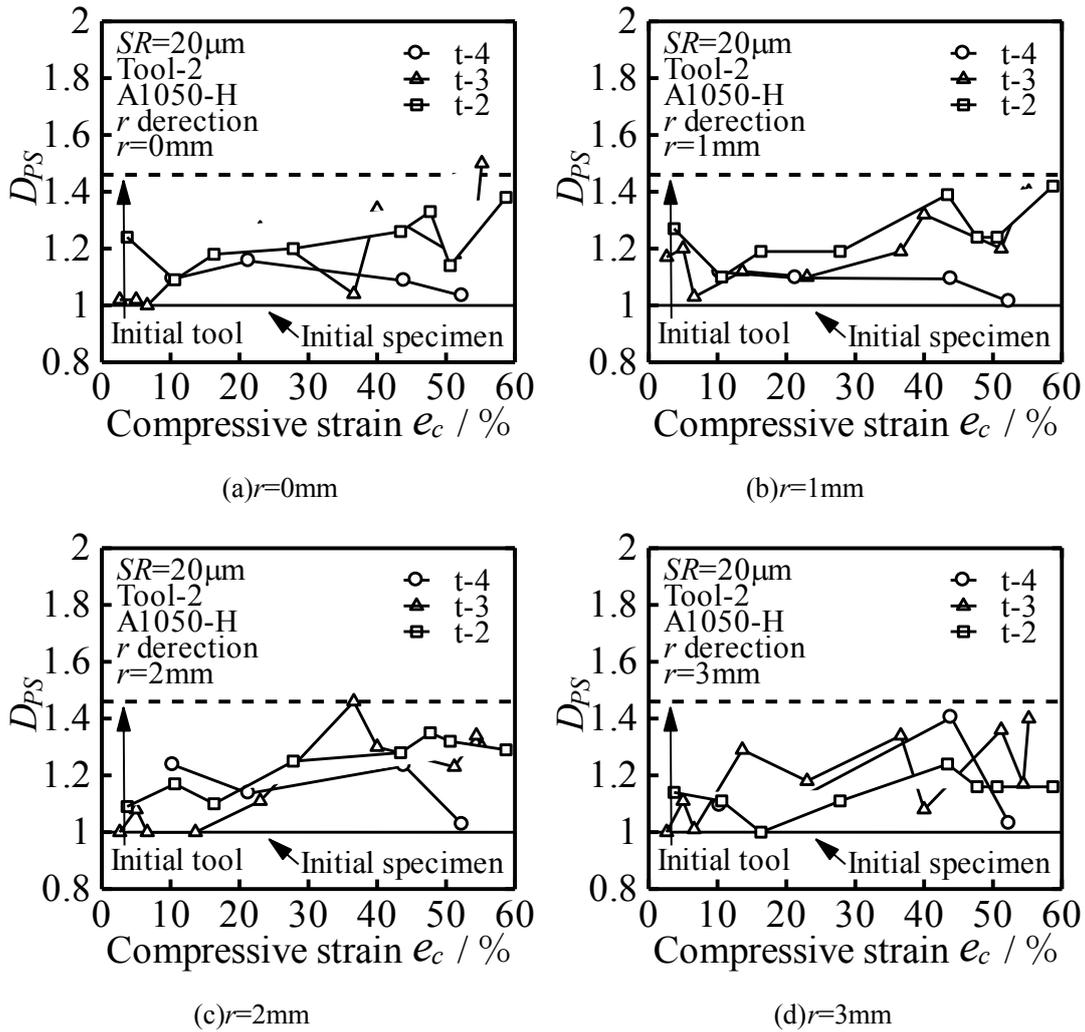


Fig.4.31 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-2, A1050-H, r 方向)

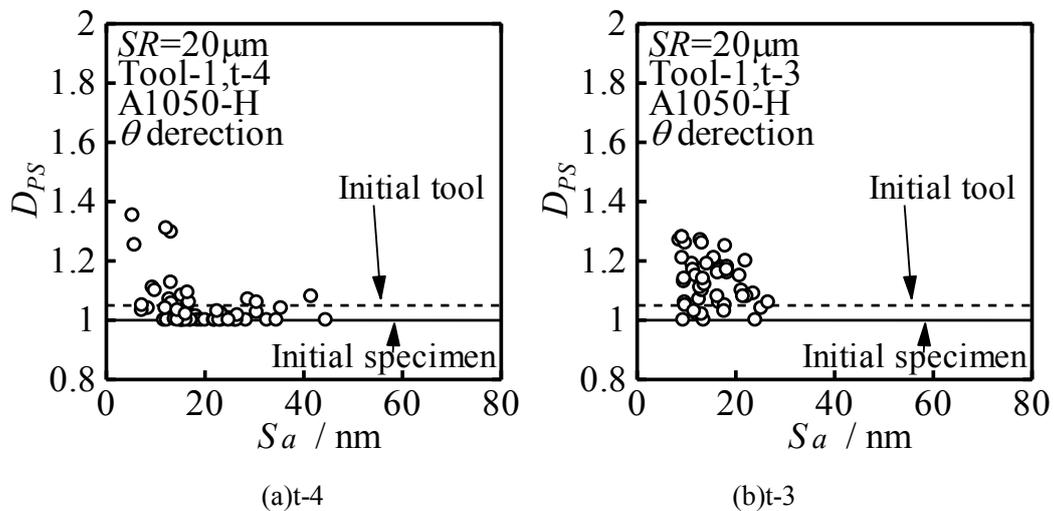
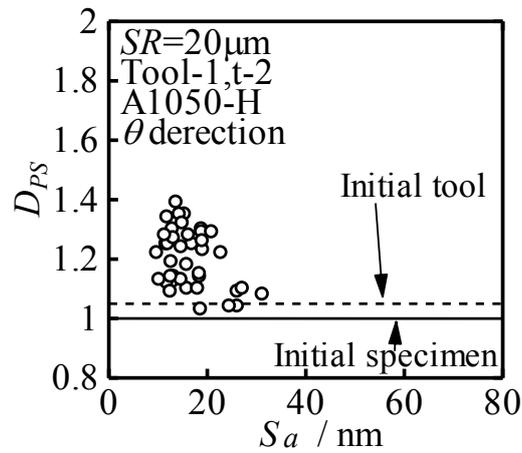
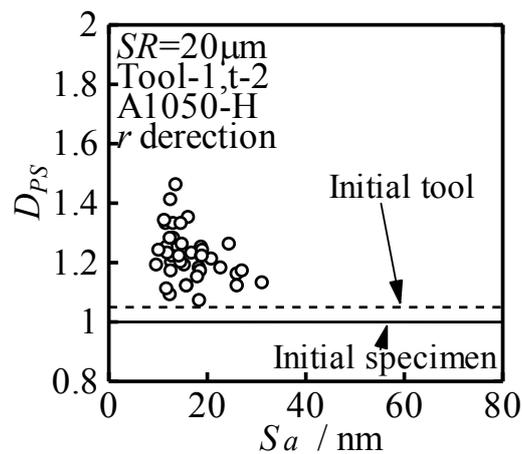
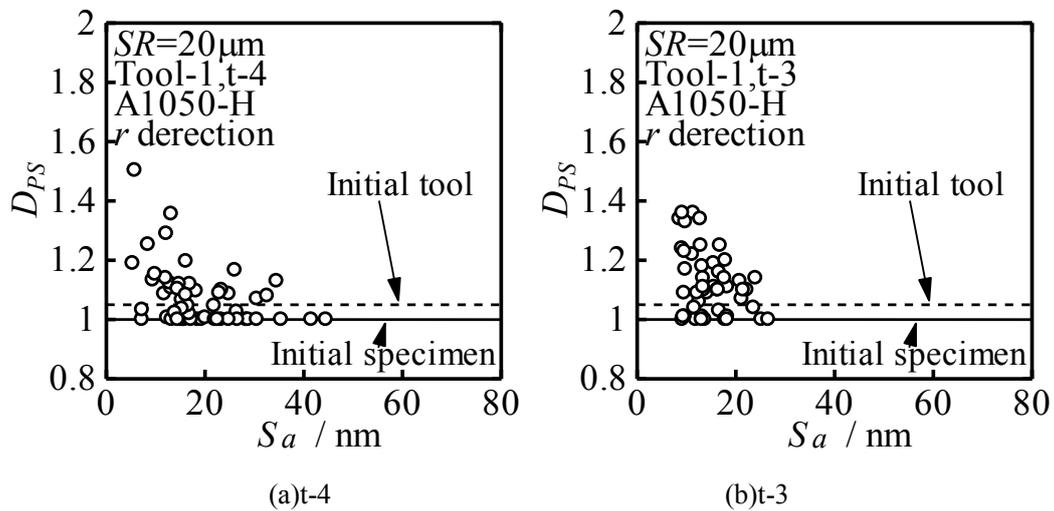


Fig.4.32 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-1, A1050-H, θ 方向)



(c)t-2

Fig.4.32 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-1, A1050-H, θ 方向)

(c)t-2

Fig.4.33 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-1, A1050-H, r 方向)

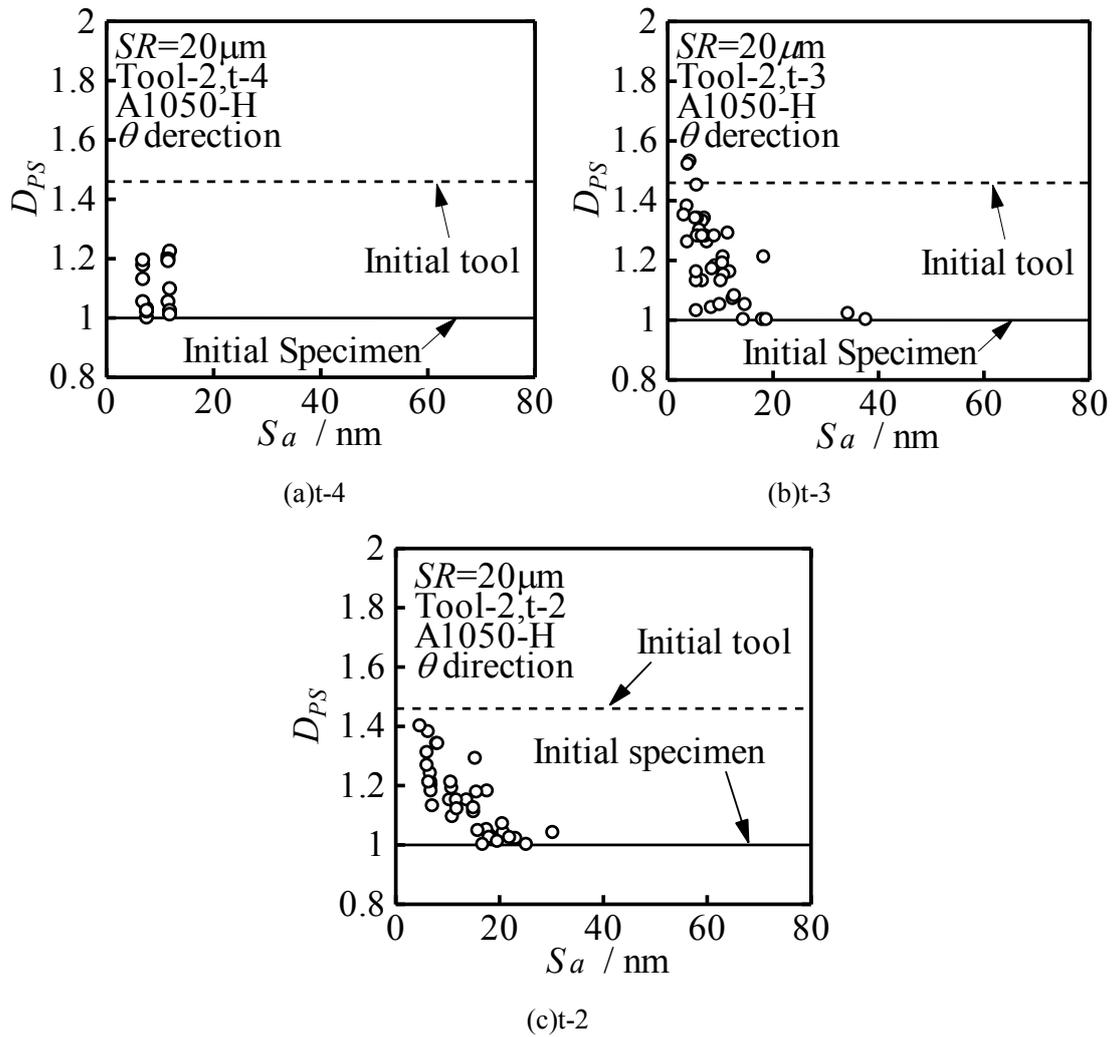


Fig.4.34 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-2, A1050-H, θ 方向)

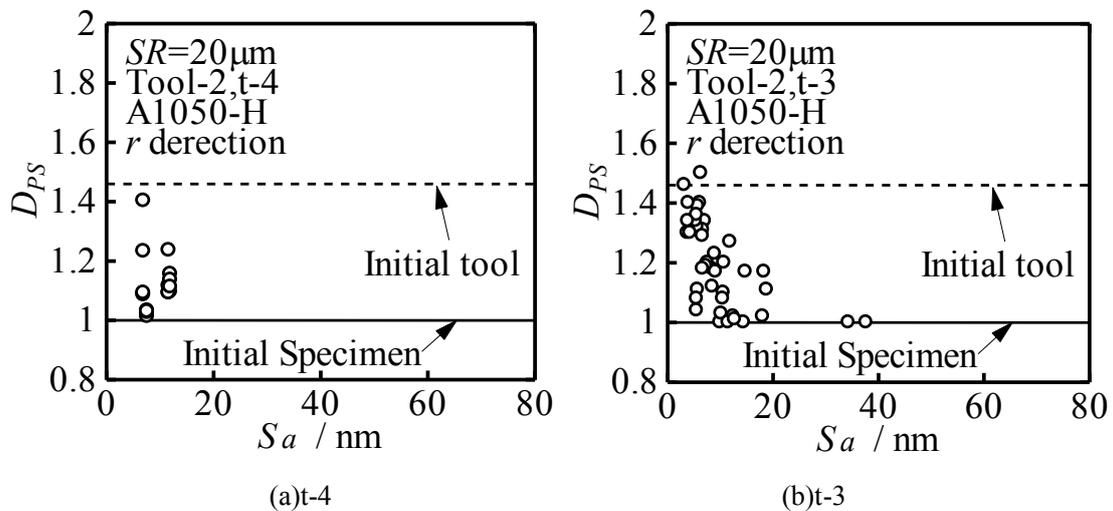
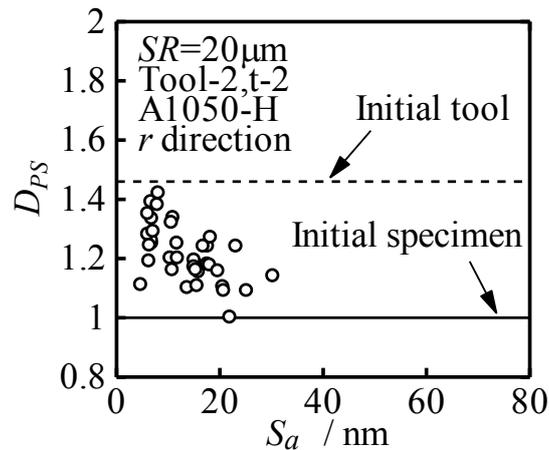


Fig.4.35 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-2, A1050-H, r 方向)



(c)t-2

Fig.4.35 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-2, A1050-H, r 方向)

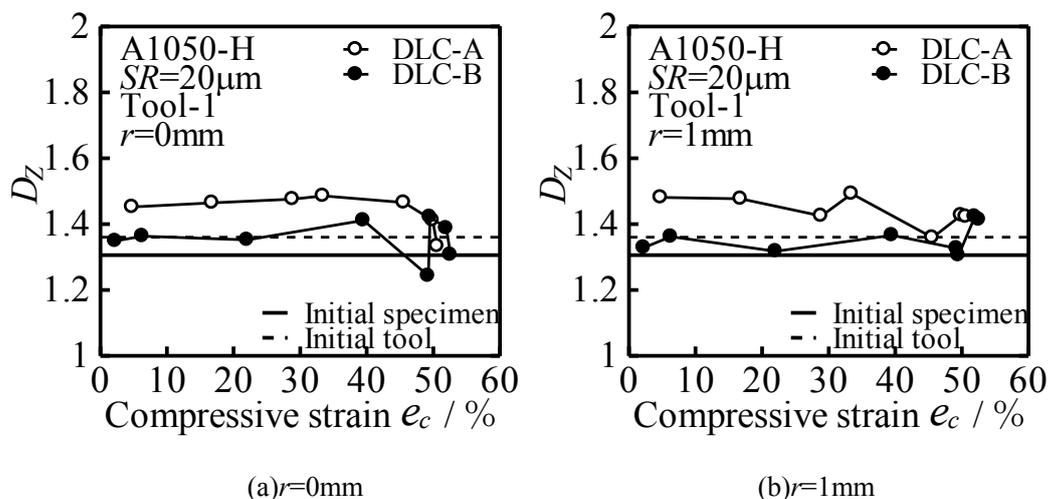
4.8 工具表面膜種の影響

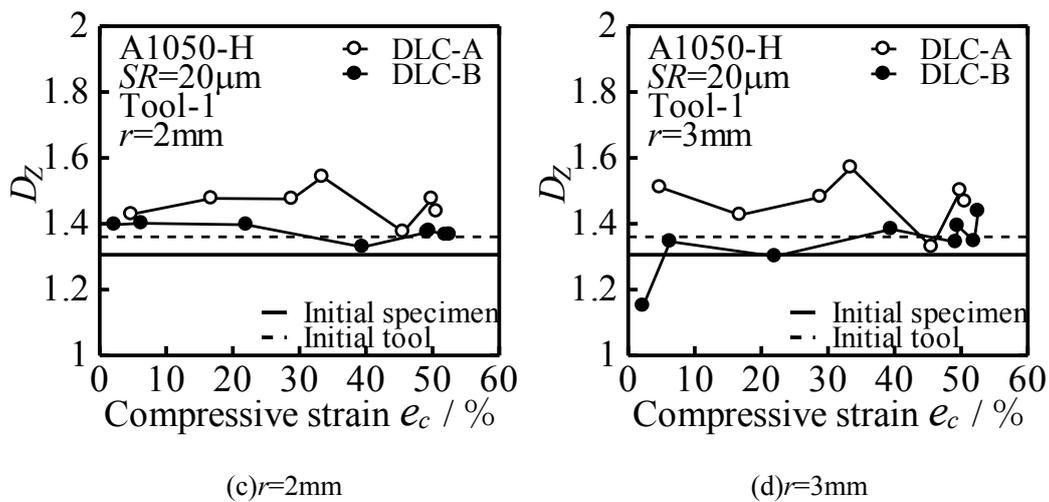
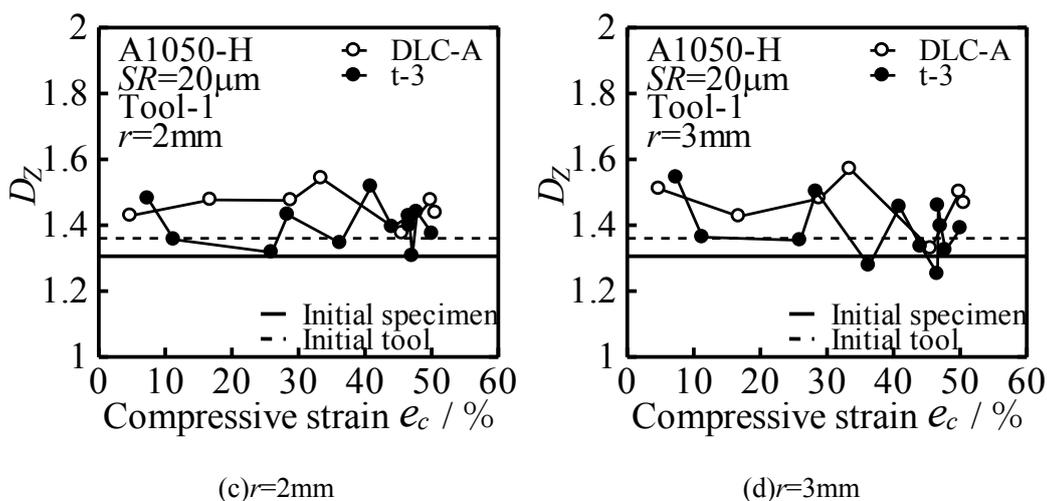
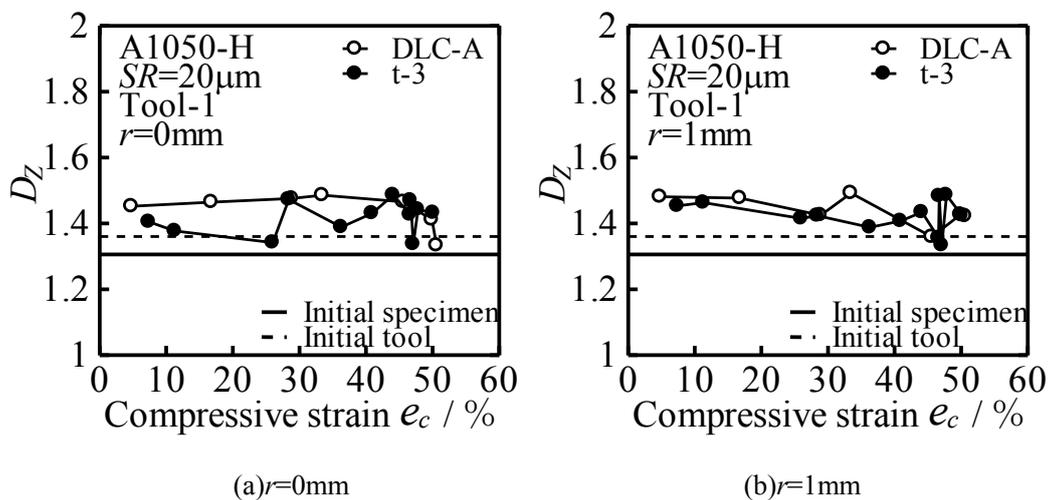
4.8.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

Fig.4.36 に Tool-1 の DLC-A, DLC-B での測定箇所ごとの零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの測定箇所でも DLC-A の方が DLC-B に比べて D_Z が大きい傾向があるが高圧縮率では同程度になる場合がある。

Fig.4.37 に Tool-1 の DLC-A, t-3 での測定箇所ごとの零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。低圧縮率では DLC-A の方が t-3 に比べて D_Z が大きい場合が多いが、高圧縮率では測定箇所ごとの違いはほとんどなく、同程度である。

Fig.4.38 に Tool-1 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。DLC-B の場合、 S_a が大きいところで D_Z の値が初期工具より小さい値を取る傾向があるが、大きな違いは見られない。

Fig.4.36 零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H)

Fig.4.36 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係(Tool-1, A1050-H)Fig.4.37 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係(Tool-1, A1050-H)

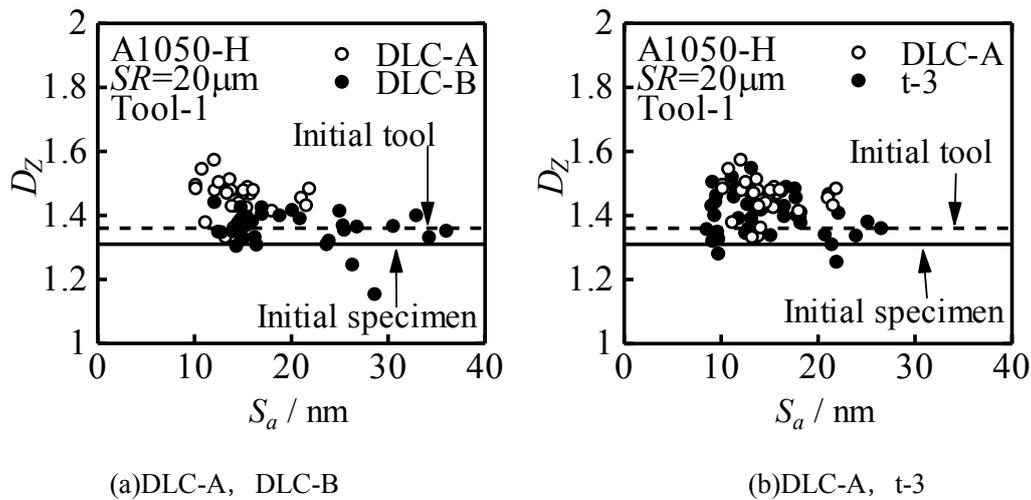


Fig.4.38 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-1, A1050-H)

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

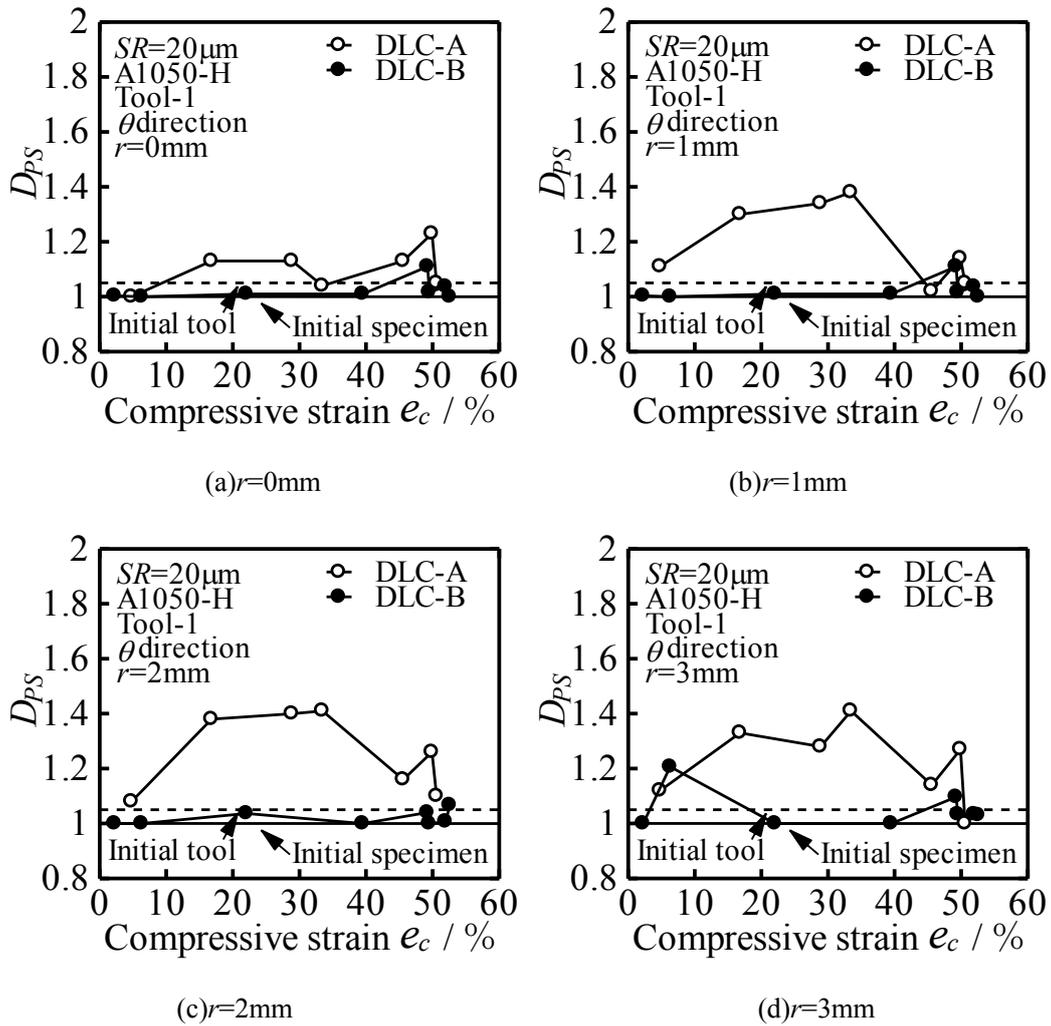
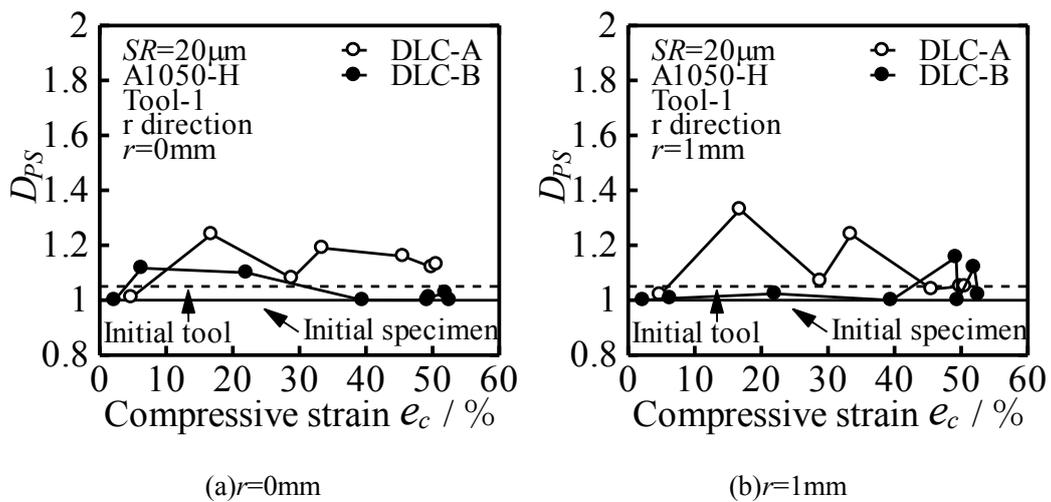
Fig.4.39, 40 に Tool-1 の計測箇所ごとの θ 方向, r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに圧縮率が 50%以下では DLC-A の方が DLC-B に比べて D_{PS} が大きな傾向がある, 圧縮率 50%以上で DLC-B は D_{PS} が大きくなり初期工具と同程度になる場合がある.

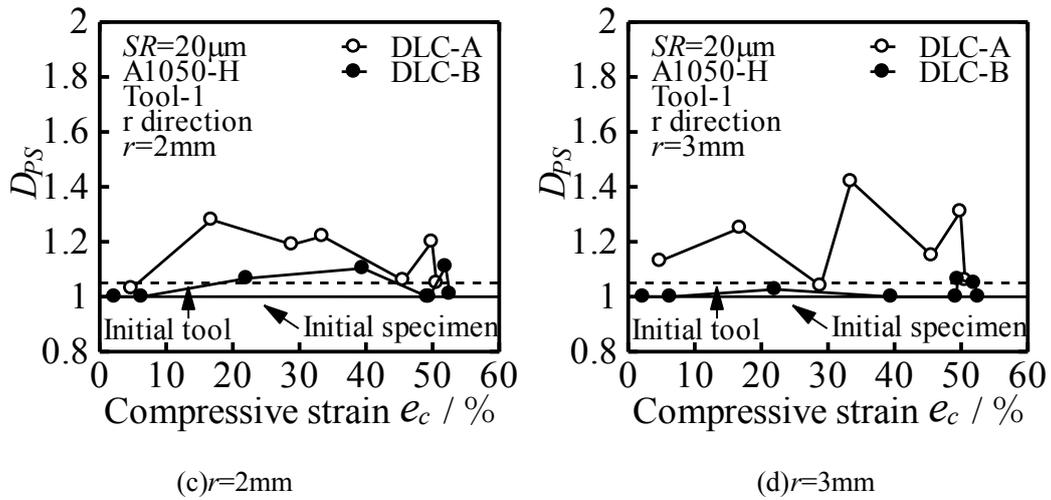
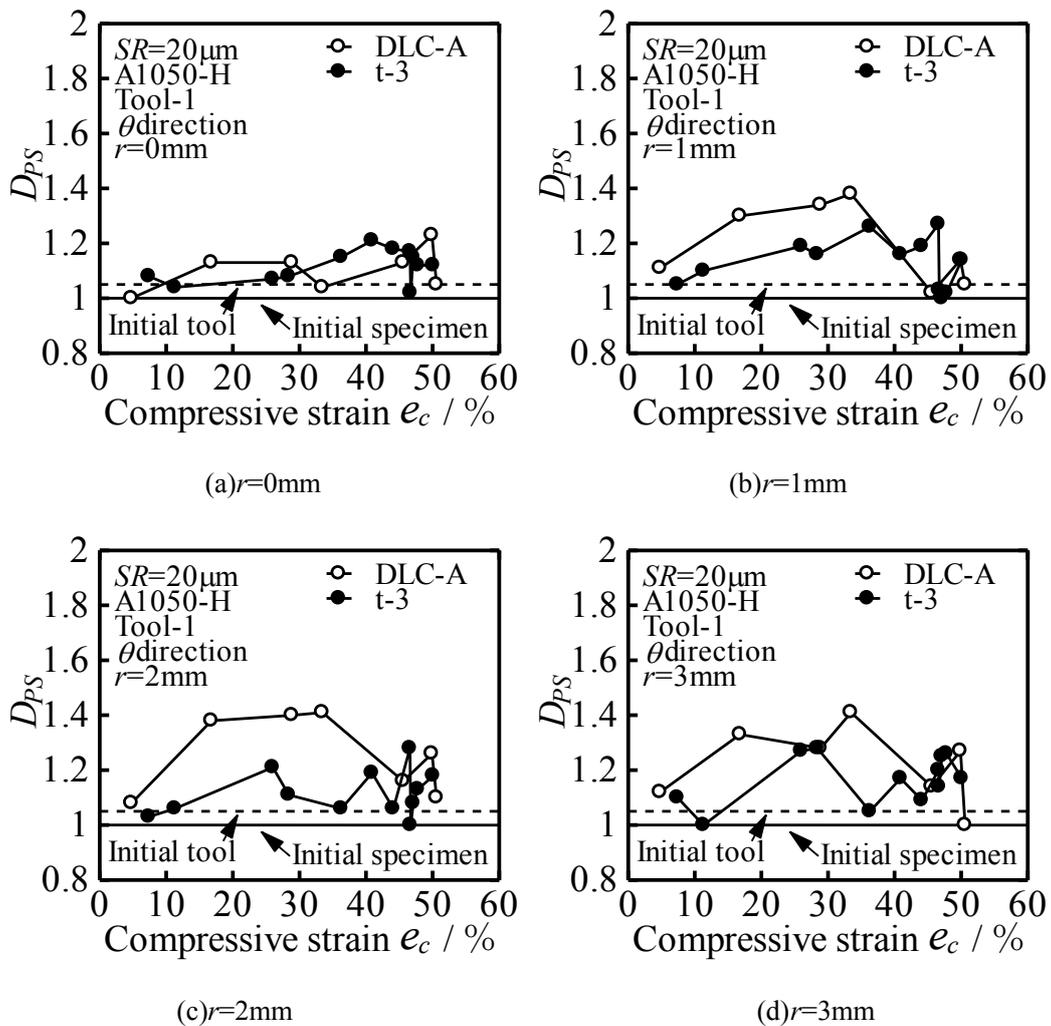
Fig.4.41, 42 に Tool-1 の計測箇所ごとの θ 方向, r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに低圧縮率では DLC-A は t-3 に比べて D_{PS} が大きい, 高圧縮率では大きな違いは見られない.

Fig.4.43 に Tool-1 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 DLC-B の方が DLC-A に比べて D_{PS} が小さい傾向がある.

Fig.4.44 に Tool-1 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 DLC-A と t-3 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.

どの膜種でも測定方向による大きな違いは見られず, S_a が小さくなると D_{PS} が大きくなる傾向がある. DLC-B は DLC-A, t-3 より D_{PS} が小さい傾向がある.

Fig.4.39 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H, θ 方向)Fig.4.40 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H, r 方向)

Fig.4.40 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H, r 方向)Fig.4.41 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H, θ 方向)

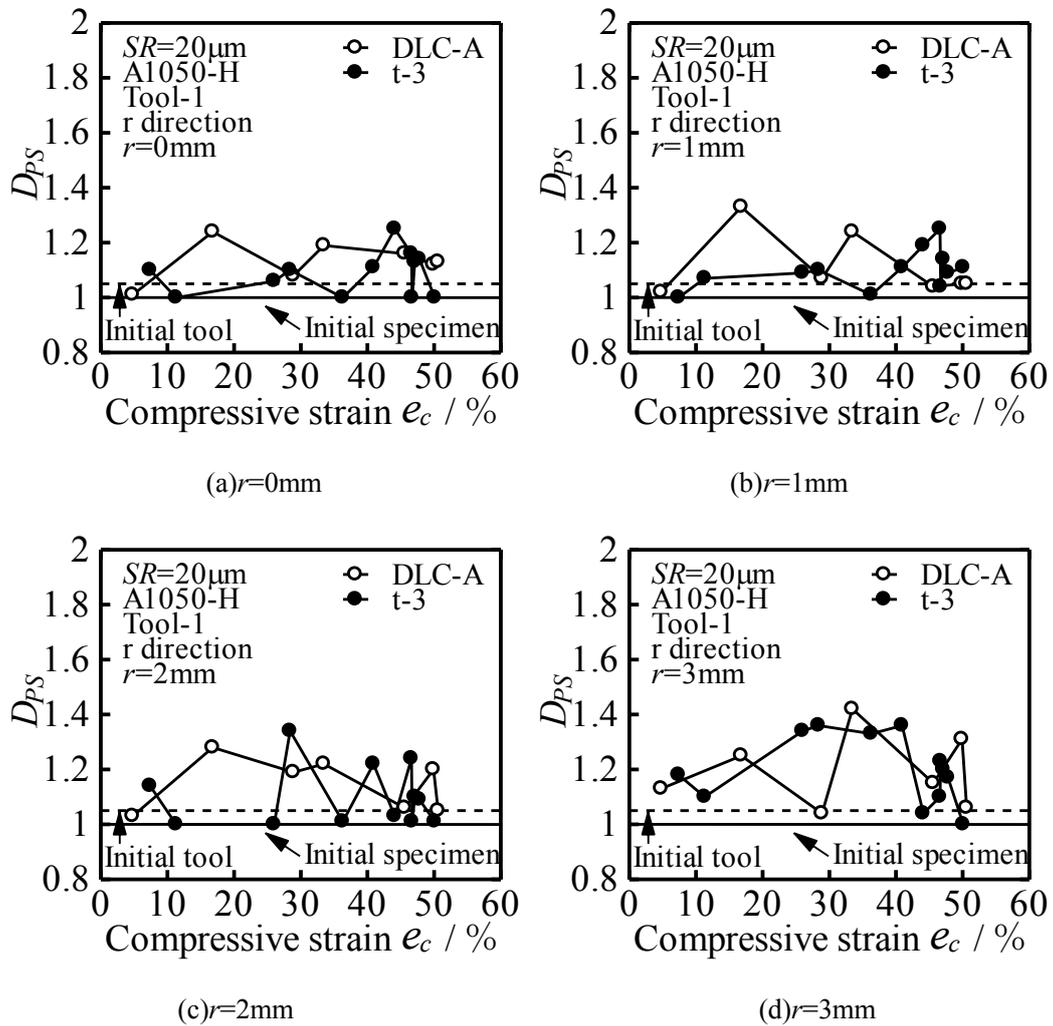


Fig.4.42 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (Tool-1, A1050-H, r 方向)

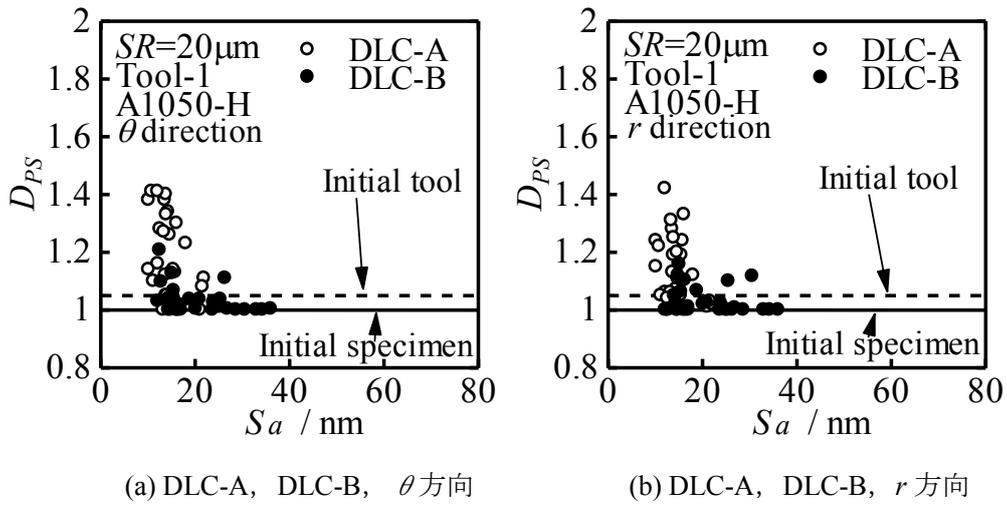


Fig.4.43 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-1, A1050-H)

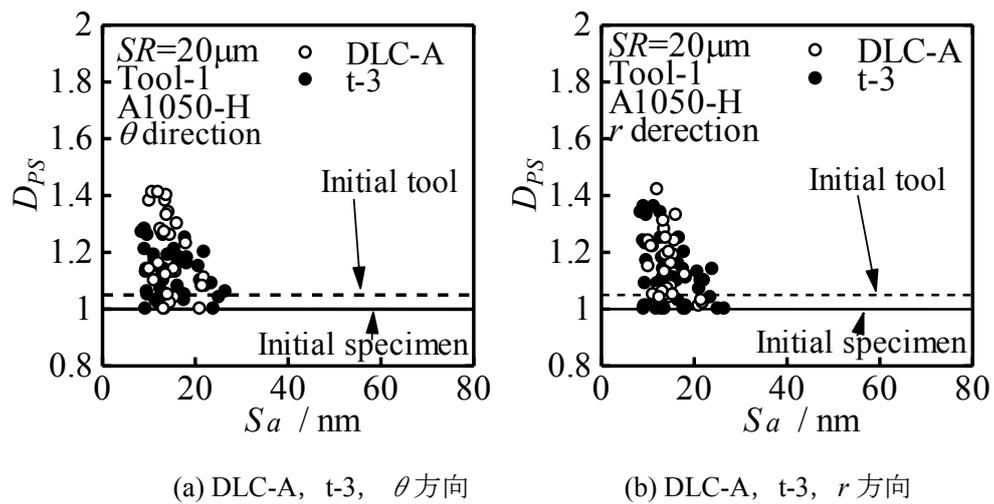


Fig.4.44 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (Tool-1, A1050-H)

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。表面粗さが $R_a=5\text{nm}$ (Tool-2) と 10nm (Tool-1) に膜厚の違いについて検討するため膜厚 $t=100\text{nm}$ (t-4) のカーボン蒸着を施し、アルミニウム引抜き材の圧縮加工を行い、工具表面粗さ、膜種の違いによる影響について検討した。また、DLCの密着性の違いによる影響について検討するために $R_a=10\text{nm}$ (Tool-1) に密着性の高いDLCコーティングを施し、アルミニウム引抜き材の圧縮試験を行い、工具表面膜種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-1($R_a=10\text{nm}$), t-4($t=100\text{nm}$)の場合、圧縮率 $e_c=35\%$ 以下ではカーボン蒸着膜の剥離面積率のばらつきが大きく、高圧縮率では剥離面積率が大きくなる。加工硬化により初期の変形抵抗が大きいH材を用いているため、低圧縮率でも初期試験片に比べ大きく平滑化される。また、圧縮率 $e_c=35\%$ 以下では剥離面積率にばらつきがあることから、試験片の表面粗さにもばらつきがみられ、外周部ではその違いが顕著に現れる。高圧縮率ではカーボン蒸着膜の剥離が大きく試験片は平滑化されない。
- (2) カーボン蒸着工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), t-4($t=100\text{nm}$)の場合、どの圧縮率でもカーボン蒸着膜の剥離は少なく、Tool-1, t-4 と比べても明らかに少ない傾向がある。加工硬化により初期の変形抵抗が大きいH材を用いているため、低圧縮率でも初期試験片に比べ大きく平滑化される。圧縮率が増すほど平滑化され、外周部で平滑化される傾向が見られるが、圧縮率 $e_c=50\%$ を超えるとわずかに粗くなる。Tool-1, t-4 と比較するとカーボン蒸着膜の剥離が少ないため、明らかに試験片が平滑化される。
- (3) DLC-B コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$), A1050-H の場合、いずれの測定箇所でも圧縮率が高いほど平滑化が進むが、50%付近では算術平均面粗さ S_a が大きくなる様子も見られる。これは高圧縮率で工具表面状態が悪化したためと考えられる。また、圧縮率が53%の外周部で最も平滑化が進む。
- (4) カーボン蒸着工具における工具表面粗さの影響について、t-4($t=100\text{nm}$)では明らかに表面粗さの大きい Tool-1 よりも表面粗さの小さい Tool-2 の方が平滑化される。Tool-1 ではカーボン蒸着膜の剥離にばらつきがあり平滑化されない場合があるが、Tool-2 では剥離は起きづらく平滑化が進む傾向がある。t-3($t=40\text{nm}$)では t-4 と同様のことが言えるが、t-2($t=20\text{nm}$)では Tool-1 と Tool-2 の結果に大きな違いは見られない。
- (5) カーボン蒸着膜膜厚の影響について、Tool-1 では剥離の少ない中心部において膜厚による違いは見られない。外周部において、低圧縮率では t-2 よりも t-3 の方が平滑化さ

れ t-4 でも同程度になる場合があるが、剥離が大きい場合はどの膜厚よりも粗くなる傾向がある。高圧縮率では t-2, t-3 の表面粗さは同程度になり、t-4 はどの膜厚よりも粗くなる傾向がある。Tool-2 では、中心部において Tool-1 と同様に膜厚による違いは見られず、高圧縮率ほど平滑化される傾向がある。外周部において、低圧縮率では膜厚による大きな違いは見られないが、高圧縮率では t-3, t-4 は同程度に平滑化され、t-2 で粗くなる傾向がある。t-4 は Tool-1 ではあまり平滑化されず、Tool-2 では平滑化されるが t-3 と大きな違いは見られないため、膜厚を $t=100\text{nm}$ までする必要はなく、 $t=40\text{nm}$ 程度で良いと考えられる。

- (6) 工具表面膜種の影響について、Tool-1, H 材の場合、硬度が高い DLC-A では、高圧縮率においても工具表面状態の悪化がほとんどなく平滑化が進む。硬度は低い密着性が高くコーティング表面粗さが大きい DLC-B は、低圧縮率では他の膜種に比べて平滑化が進まないが、高圧縮率の外周部において DLC-A や t-3 と同程度に平滑化が進む。これは、コーティング表面の S_a が大きくても材料流動によるしごき効果により平滑化が進んだと考えられる。t-3 (カーボン蒸着膜) では、高圧縮率で工具表面状態の悪化が観察されたが、工具表面状態の影響のない箇所では DLC-A と同程度の平滑度が得られる。
- (7) フラクタル解析を行った結果、零点集合次元 D_z はばらつきが大きく、工具表面粗さ、カーボン蒸着膜膜厚、工具表面膜種の違いによる影響は見られなかった。パワースペクトル次元 D_{PS} は、どの膜種でも測定方向による大きな違いは見られず、 S_a が小さくなると D_{PS} が大きくなる傾向が見られた。

[参考文献]

- (1) 大沢 優樹, 橋本 真一郎, 梶野 智史, 浅川 基男: 棒線における超平滑化引抜き加工の研究, 機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, 8号(2000), 171-172.
- (2) 桐野宇治, 榎本俊之: 銅の超平滑化技術に関する研究, 砥粒加工学会論文集, 56巻, 5号, (2012-5), 325-550.
- (3) 中村 保, 近藤 一義, 西ヶ谷 知栄: 塑性加工における表面平滑化条件, 日本機械学会論文集 (C 編), 56巻, 530号, (1990-10), 268-275.
- (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) 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.
- (6) 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.
- (7) H.J. Li, Z.Y. Jiang, D.B. Wei, X. Zhang: Microtexture based analysis of surface asperity flattening behavior of annealed aluminum alloy in uniaxial planar compression, Tribology International, Vol. 66, (2013), 282-288.
- (8) H.J. Li, Z.Y. Jiang, D.B. Wei, X. Gao: Influence of Friction on Surface Asperity Flattening Process in Cold Uniaxial Planar Compression (CUPC), Tribol Lett, Vol 53, (2014), 383-393.
- (9) 高倉章雄: 金属材料の塑性変形に伴う粗面化現象と薄板の成形限界に関する研究, 平成6年度 博士論文 (京都大学工学研究科), (1994), 2-6.
- (10) M. Nasari, M. Reihanian, E. Borhani, Effect of strain path on microstructure, deformation texture and mechanical properties of nano/ultrafine grained AA1050 processed by accumulative roll bonding (ARB), Vol. 67, (2016), 288-298.
- (11) Xiaoliang, Zhang, Xiu, Wang, Wen, Kong, Gewen, Yi, Junhong, Jia: Tribological behavior of micro/nano-patterned surfaces in contact with AFM colloidal probe, Applied Surface Science, Vol. 58, (2011), 113-119.
- (12) 上谷 俊平: アルミニウムの超平滑化に関する研究, 天田財団助成研究成果報告書, 26巻, (2013), 38-41.
- (13) 片岡征二: ドライブレス加工を目的とした DLC 膜の工具への密着性向上, 湘南工科大学紀要, 42巻, 1号, (2008), 3-18.
- (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, 短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)関悠太郎, 単軸圧縮加工によるアルミニウムの超平滑化に関する検討, 平成 27 年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2016)
- (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), 3-6.
- (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), 6-17.
- (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), 18-20.
- (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), 23-24.
- (29)脇圭希, 圧縮加工によるアルミニウム表面の超平滑化, 平成 25 年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2013), 24-27.
- (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)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.
- (32)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.
- (33)脇圭希, 圧縮加工によるアルミニウム表面の超平滑化, 平成 25 年度 修士論文 (三重

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

謝辞

本研究の遂行および論文作成にあたり、終始懇切なるご指導いただきました松井正仁准教授、中村裕一准教授、高橋裕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上江洲由悟氏、鷲一輝氏、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。