

令和五年度 修士論文

圧縮加工による金属の超平滑面創成

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

武田 直樹

目次

第1章 緒論	1
第2章 実験方法	3
2.1 供試材と試験片	3
2.1.1 供試材	3
2.1.2 試験片の制作	3
2.2 圧縮試験工具	5
2.2.1 圧縮試験工具の製作	5
2.2.2 DLC コーティング	10
2.2.3 DLC コーティングによる表面状態の影響	10
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 スコープレコーダ DL350 の使用方法	19
2.5 触針式表面粗さ計(Surftest SJ-400)による評価方法	24
2.6 原子間力顕微鏡(AFM)による観察方法	25
2.7 工具表面の撮影方法	27
2.8 有限要素法(FEM)解析	30
2.8.1 解析モデルと条件	30
2.8.2 摩擦係数 μ の決定方法	30
2.8.3 相対すべり量 L_S と工具接触面圧 p の計算	32
第3章 圧縮加工による平滑化挙動	33
3.1 DLC コーティング工具 Tool-1($R_a=10\text{nm}$), A5052-H における実験結果	35
3.1.1 圧縮率と表面粗さの関係	35
3.1.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	37
3.1.3 有限要素法(FEM)解析結果	41
3.2 DLC コーティング工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), A5052-H における実験結果	43
3.2.1 圧縮率と表面粗さの関係	43
3.2.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	45
3.2.3 有限要素法(FEM)解析結果	49
3.3 DLC コーティング工具 Tool-1($R_a=10\text{nm}$), A5052-O における実験結果	51
3.3.1 圧縮率と表面粗さの関係	51

3.3.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	53
3.3.3	有限要素法(FEM)解析結果	57
3.4	DLC コーティング工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), A5052-O における実験結果	59
3.4.1	圧縮率と表面粗さの関係	59
3.4.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	61
3.4.3	有限要素法(FEM)解析結果	65
3.5	工具表面粗さの影響	67
3.5.1	A5052-H の結果	67
3.5.1.1	圧縮率と表面粗さの関係	67
3.5.1.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	69
3.5.1.3	有限要素法(FEM)解析結果	70
3.5.2	A5052-O の結果	71
3.5.2.1	圧縮率と表面粗さの関係	71
3.5.2.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	73
3.5.2.3	有限要素法(FEM)解析結果	75
3.6	加工硬化の影響	75
3.6.1	圧縮率と表面粗さの関係	75
3.6.2	原子間力顕微鏡(AFM)による表面の観察と評価	77
3.6.3	有限要素法(FEM)解析結果	79
3.7	材料の影響	81
3.7.1	A5052-H と A1050-H の比較	81
3.7.1.1	圧縮率と表面粗さの関係	81
3.7.1.2	原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価	83
3.7.1.3	有限要素法 (FEM) 解析結果	85
3.7.2	A5052-H と C1020-H の比較	87
3.7.2.1	圧縮率と表面粗さの関係	87
3.7.2.2	原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価	88
3.7.2.3	有限要素法 (FEM) 解析結果	91
3.7.3	A5052-O と A1050-O の比較	93
3.7.3.1	圧縮率と表面粗さの関係	93
3.7.3.2	原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価	94
3.7.3.3	有限要素法 (FEM) 解析結果	97
3.7.4	A5052-O と C1020-O の比較	98
3.7.4.1	圧縮率と表面粗さの関係	98
3.7.4.2	原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価	100
3.7.4.3	有限要素法 (FEM) 解析結果	102

3.8	まとめ	104
第4章 加工品表面のフラクタル解析		
4.1	フラクタルの説明	107
4.2	フラクタル次元の決定法	109
4.2.1	零点集合次元	109
4.2.2	パワースペクトル次元	110
4.3	AFM システムにおけるフラクタル次元の測定法	113
4.3.1	零点集合次元 D_Z の測定法	113
4.3.2	パワースペクトル次元 D_{PS} の測定法	116
4.4	DLC コーティング工具 Tool-1($R_a=10\text{nm}$), A5052-H における解析結果	116
4.4.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	116
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	117
4.5	DLC コーティング工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), A5052-H における解析結果	119
4.5.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	119
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	120
4.6	DLC コーティング工具 Tool-1($R_a=10\text{nm}$), A5052-O における解析結果	122
4.6.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	122
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	123
4.7	DLC コーティング工具 Tool-2($R_a=5\text{nm}$), A5052-O における解析結果	124
4.7.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	124
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	125
4.8	工具表面粗さの影響	127
4.8.1	A5052-H の結果	127
4.8.1.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	127
4.8.1.2	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	128
4.8.2	A5052-O の結果	129
4.8.2.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	129
4.8.2.2	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	130
4.9	加工硬化の影響	132
4.9.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	132
4.9.2	パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果	133
4.10	材料の影響	136
4.10.1	A5052-H と A1050-H の比較	136
4.10.1.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	136
4.10.1.2	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	138

4.10.2	A5052-H と C1020-H の比較	140
4.10.2.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	140
4.10.2.2	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	142
4.10.3	A5052-O と A1050-O の比較	144
4.10.3.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	144
4.10.3.2	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	146
4.10.4	A5052-O と C1020-O の比較	148
4.10.4.1	零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果	148
4.10.4.2	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	150
4.11	まとめ	152
第 5 章 結論		155
参考文献		157
謝辞		160

第1章 緒論

近年、様々な分野の発展により機械製品の小型化や高品質化が求められるようになった。現在でも工作機械による加工の高精度化、高速化、対象材料の拡大が試みられており、数 $10\mu\text{m}$ の部品の加工や nm オーダーの加工が可能になっている⁽¹⁾。それらの微小部品においては表面状態が大きな影響を及ぼすため、表面の平滑化が求められる。表面平滑化には研磨加工が一般的に用いられるが、塑性加工による表面平滑化が可能になれば生産性の向上やコストの低減が見込める。

これまで金属表面における平滑化に関する研究は、中村ら⁽²⁾の塑性加工における表面平滑化条件に関する研究、村岡ら⁽³⁾のアルミニウム合金棒材の超平滑化に関する研究、H. B. Xieら⁽⁴⁾の鋼を冷間圧延するときの板厚減少率などの表面粗さへの影響に関する研究、H. J. Liらのアルミニウムを単軸圧縮するときの潤滑剤の有無が表面粗さに及ぼす影響を調べた研究⁽⁵⁾、単軸圧縮加工における焼鈍したアルミニウム合金の表面平滑化の微細構造での解析に関する研究⁽⁶⁾、冷間単軸圧縮加工における表面平滑化の摩擦の影響に関する研究⁽⁷⁾、小西らの潤滑油添加剤による摺動部の平滑化の維持に関する研究⁽⁸⁾、桜田らの接触抵抗とめつき表面状態の関係に関する研究⁽⁹⁾、岡田らの工具回転型バニシング加工による樹脂射出成形用アルミニウム合金金型の機上仕上げに関する研究⁽¹⁰⁾、Gyo Myeongらの表面粗さが圧延AZ31合金の曲げ特性に与える影響に関する研究⁽¹¹⁾、Yizhuo Liらの表面粗さがアルミニウム合金のねじり疲労特性に与える影響に関する研究⁽¹²⁾などが行われている。

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

トライド)コーティングを施し A1050-O の圧縮試験を行ったところ、DLC と比較すると TiN の方が測定箇所による平滑度の差が小さく、中心部の低圧縮率でより平滑化が進むことがわかった⁽²⁰⁾。 $R_a=10\text{nm}$ と $R_a=5\text{nm}$ の工具に DLC コーティングを施し C1020-H と C1020-O の圧縮試験を行った場合、加工硬化の違いによる影響を比較すると $R_a=10\text{nm}$ では低圧縮率において平滑度に大きな違いは見られず、高圧縮率の中心部では C1020-O の方が平滑化が進むことがわかった⁽²¹⁾、⁽²²⁾。 $R_a=5\text{nm}$ では測定箇所によらず低圧縮率で C1020-H の方が平滑化が進み、高圧縮率では平滑度に大きな違いは見られないことがわかった⁽²¹⁾、⁽²²⁾。 工具表面粗さの違いによる影響を比較すると、 $R_a=5\text{nm}$ の工具の方が明らかに平滑化が進み、特に低圧縮率において差が大きく、圧縮率が大きくなるにつれてその差は小さくなることがわかった⁽²¹⁾、⁽²²⁾。 $R_a=10\text{nm}$ 、 $R_a=5\text{nm}$ とともに外周部ほど材料流動によるしごき効果により平滑化が進み、 $R_a=10\text{nm}$ では圧縮が進むと初期工具と同程度の平滑度が得られるが、 $R_a=5\text{nm}$ では初期工具ほどの平滑度が得られないことがわかった⁽²¹⁾、⁽²²⁾。 TiN コーティングを施した工具で C1020-H の圧縮試験を行ったところ、DLC と比較すると $R_a=10\text{nm}$ において低圧縮率の中心部では TiN の方が平滑化が進み、高圧縮率では違いは見られなかった。 $R_a=5\text{nm}$ では圧縮率、測定箇所によらず平滑度に大きな差は見られなかった⁽²²⁾。 C1020 と A1050 の結果と比較すると、いずれの条件においても変形抵抗の大きい無酸素銅の方がアルミニウムよりも中心部において平滑化が進み、高圧縮率では大きな差は見られないことがわかった⁽²³⁾。 TiN コーティングを施した工具で C1020-O の圧縮試験を行ったところ、A1050-O と比較すると低圧縮率では C1020-O の方が平滑化が進むことがわかった⁽²³⁾。

本研究では、A5052-H と A5052-O について、Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$)、Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) の工具表面に潤滑剤として DLC コーティングを施した工具を用いて圧縮試験を行い、両者の結果を比較することで工具表面粗さの影響と加工硬化の影響、これまでに行った A1050、C1020 の結果と比較することで材料の影響についても検討した。 実験結果の検討では、触針式表面粗さ計を用いて工具および圧縮前後の試験片表面を算術平均粗さ R_a によって評価し、原子間力顕微鏡(AFM)を用いた試験片表面の観察による粗さの評価を行った。 また、有限要素法(FEM)解析を用いて工具と材料間の相対すべり量と平滑度の関係、面圧と平滑度の関係を検討した。 さらに、工具および試験片表面の凹凸形状の複雑さについて検討するために、工具と試験片表面のフラクタル解析による評価も行った。

第2章 実験方法

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

本章では、実験方法および実験条件、各解析の手順を示す。

2.1 供試材と試験片

2.1.1 供試材

本実験では供試材としてアルミニウム引抜き材 (A5052BD-H34) を用いた。Table 2.1 にアルミニウム引抜き材の化学成分と機械的性質を示す。このアルミニウム引抜き材に対して以下に示す試験片を作成した後、焼きなまし処理を行ったものを使用した。焼きなまし条件は 360°C 、1 時間保持後、徐冷とした。

Table 2.1 アルミニウム引抜き材(A5052BD-H34)の化学成分

Material	Cu/%	Si/%	Fe/%	Mn/%	Mg/%	Zn/%	Cr/%	Al/%
A5052-BD	0.02	0.08	0.11	0.01	2.60	0.00	0.25	96.93

2.1.2 試験片の製作

供試材より、直径 7mm 、高さ 100mm の円筒を旋削し、マイクロソー (笠井商工株式会社製, RCA-005) を用いて板厚が 0.9mm になるように切断した。マイクロソーによる試験片の切断については上江洲⁽²⁴⁾に基づき行った。切断後、#1500 のサンドペーパーと粒径 $3\mu\text{m}$ のアルミナ (株式会社フジ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。試験片の算術平均粗さは $R_a=80\text{nm}$ となるよう研磨した。研磨方法については脇⁽²⁵⁾に基づき作成を行った。また、Fig.2.1 に試験片の寸法、Fig.2.2 に試験片の外観、Fig.2.3 に試験片表面の AFM 像の例、Fig.2.4 に試験片表面の断面曲線を示す。

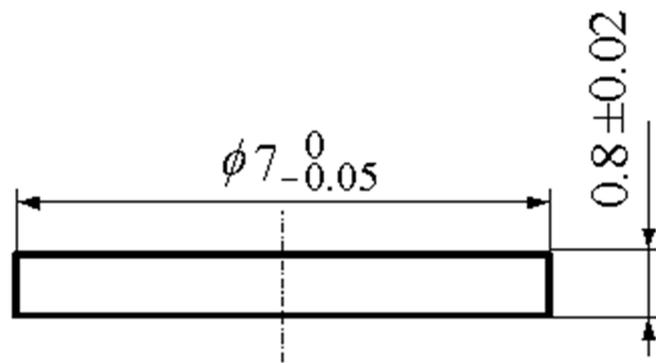
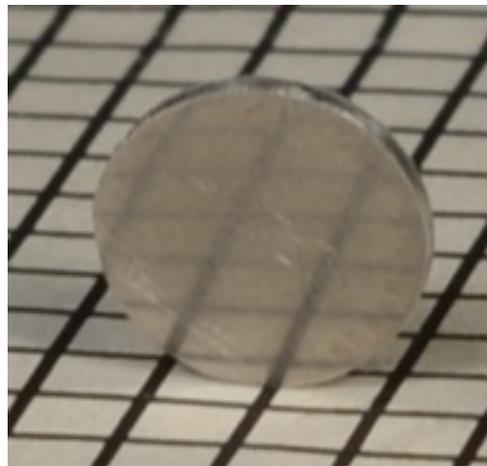


Fig.2.1 試験片の寸法



5mm

Fig.2.2 初期アルミニウム試験片の外観 ($e_c=0\%$, $R_a=80\text{nm}$)

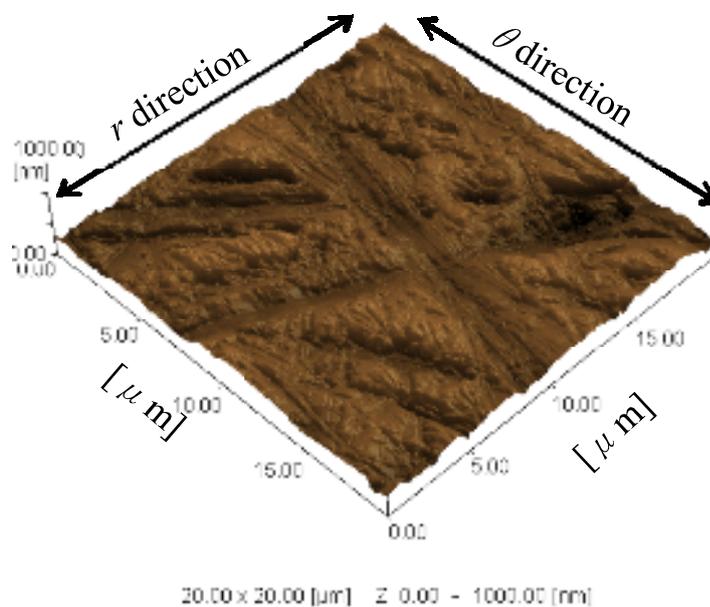


Fig.2.3 初期アルミニウム試験片表面の AFM 像 ($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)

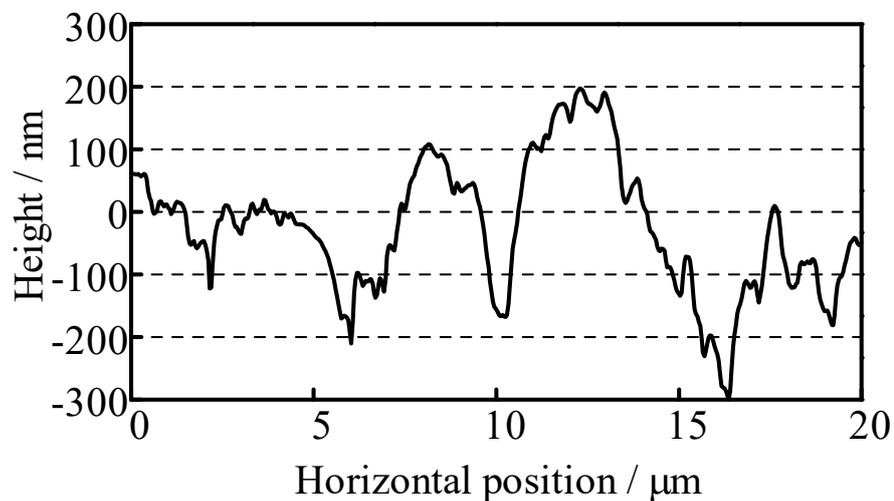


Fig.2.4 初期アルミニウム試験片表面の断面曲線

2.2 圧縮試験工具

2.2.1 圧縮試験工具の製作

本研究では表面粗さの異なる工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$), Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) を使用した. Fig.2.5 に工具の寸法を示す. Fig.2.6 に圧縮試験に用いた工具 Tool-1 の製作手順と各工程終了後の

圧縮部表面の算術平均粗さ R_a の目安を, Fig.2.7 に圧縮試験に用いた工具 Tool-2 の製作手順と各工程終了後の圧縮部表面の算術平均粗さ R_a の目安を示す. 研磨方法については脇⁽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. 工具は SKD11 鋼, 焼き入れ硬さ HRC60~62 であり, 納入時には表面に研削を施した状態であった. このときの工具表面の最大高さ粗さは $R_z=0.95\mu\text{m}$ である.

Fig.2.8 に研磨後の Tool-1 工具の外観, Fig.2.9 に Tool-1 工具表面の AFM 像, Fig.2.10 に Tool-1 工具表面の断面曲線, Fig.2.11 に研磨後の Tool-2 工具の外観, Fig.2.12 に Tool-2 工具表面の AFM 像, Fig.2.13 に Tool-2 工具表面の断面曲線を示す.

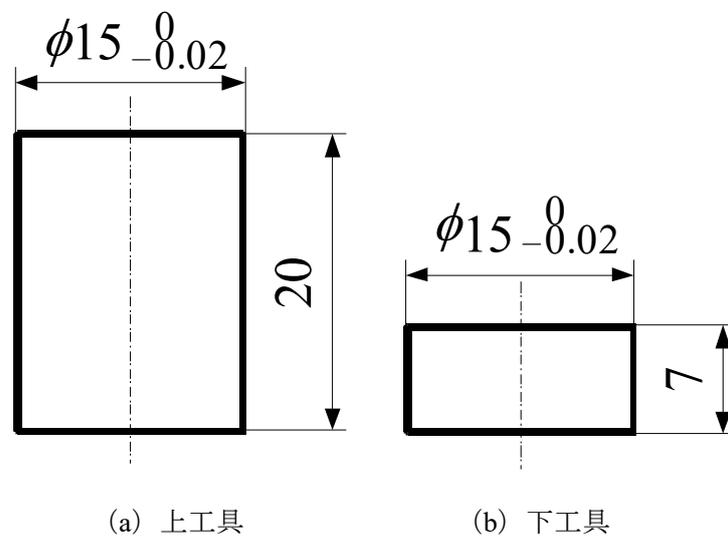


Fig.2.5 工具の寸法

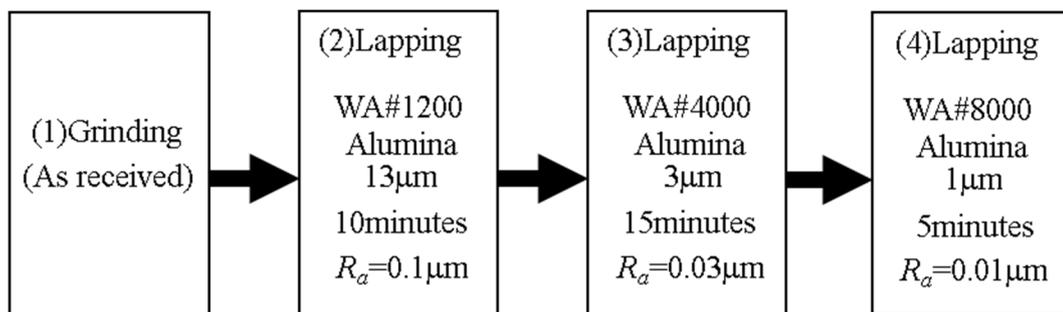


Fig.2.6 工具の製作手順 (Tool-1)

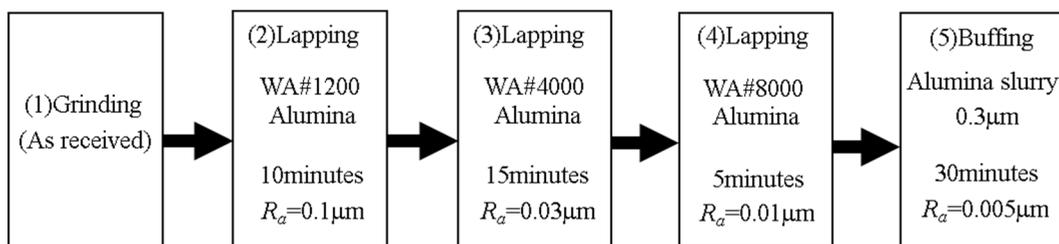


Fig.2.7 工具の製作手順 (Tool-2)

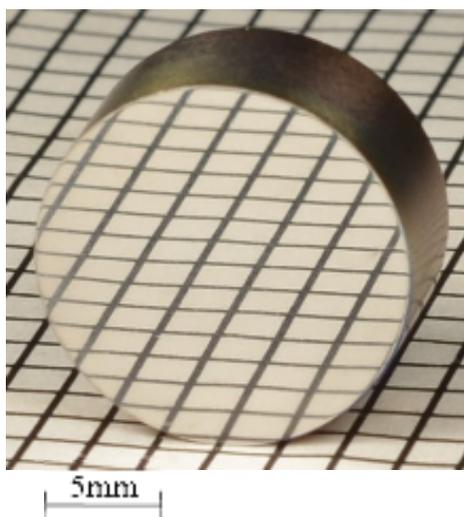


Fig.2.8 研磨後の工具表面 (Tool-1)

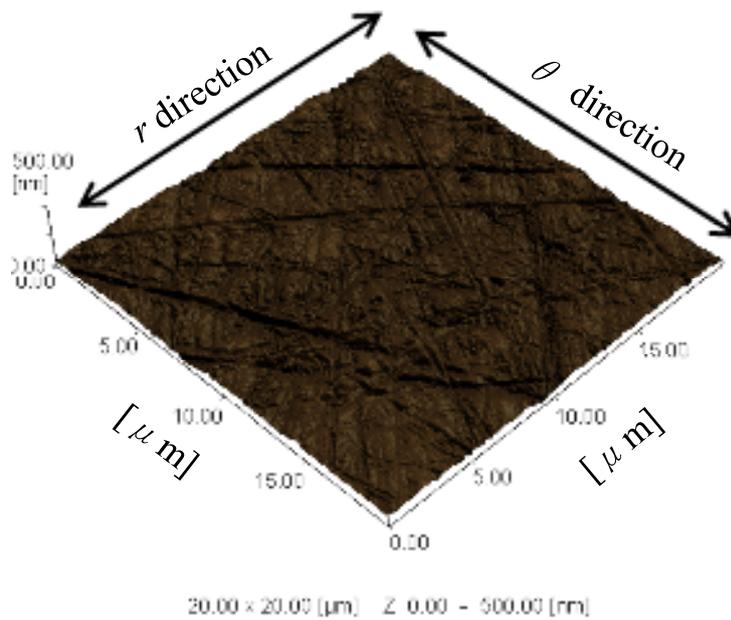


Fig.2.9 工具表面のAFM像 (SR=20μm, Tool-1)

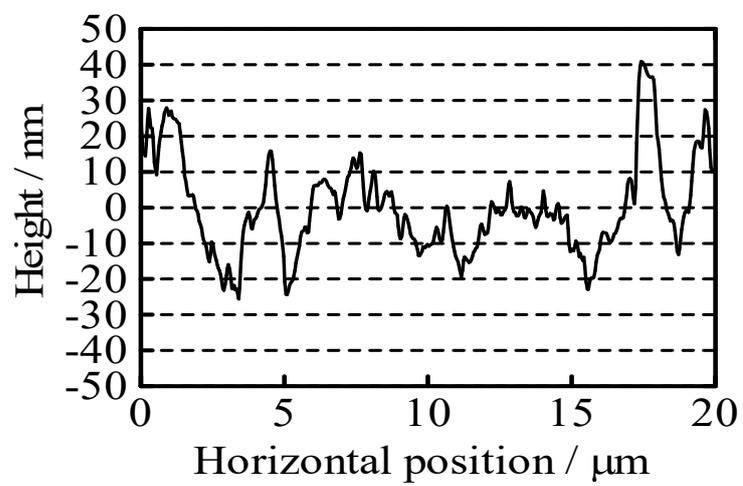


Fig.2.10 工具表面の断面曲線 (Tool-1)



Fig.2.11 研磨後の工具表面 (Tool-2)

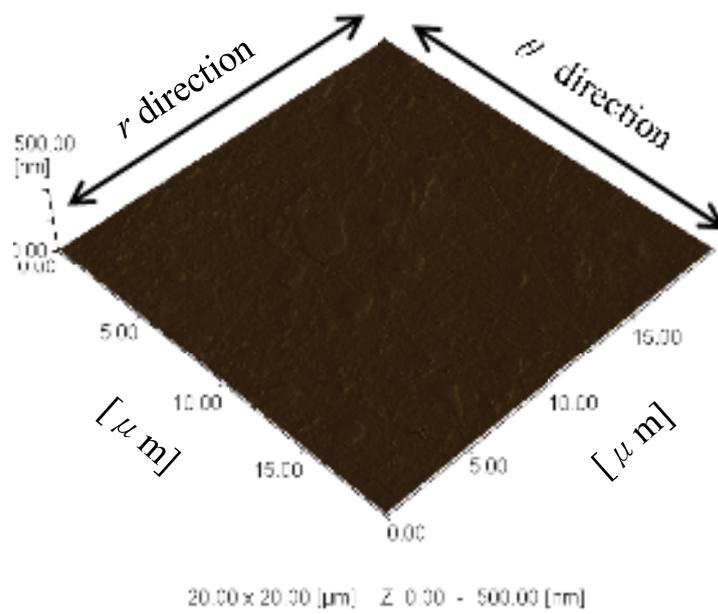


Fig.2.12 工具表面の AFM 像 ($SR=20\mu\text{m}$, Tool-2)

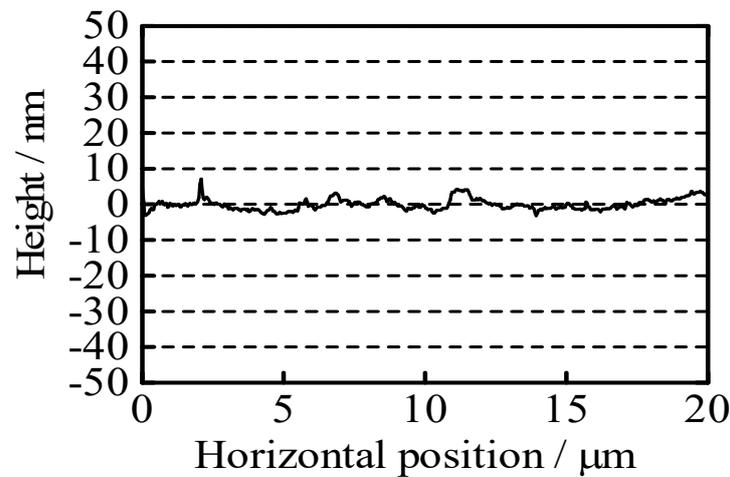


Fig.2.13 工具表面の断面曲線 (Tool-2)

2.2.2 DLC コーティング

工具への DLC (Diamond Like Carbon) 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。

Table 2.2 DLC コーティングの仕様

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

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

2.2.3 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コーティングによる工具表面状態の影響を調べるため、コーティング前後の各種データの比較を行った。

Fig.2.14 に A5052-H, Fig.2.15 に A5052-O の圧縮に使用した DLC コーティング工具 Tool-1 のコーティング前後の算術平均粗さ R_a , 後述する算術平均面粗さ S_a (2.6 参照), 第 4 章で述べる零点集合次元 D_z およびパワースペクトル次元 D_{PS} を示す。コーティング後に, R_a

は僅かに大きくなる傾向にあり, S_a は大きくなる. D_z はあまり変化しない. D_{PS} はばらつきが出ている.

Fig.2.16に A5052-H, Fig.2.17に A5052-O の圧縮に使用した DLC コーティング工具 Tool-2 のコーティング前後の算術平均粗さ R_a ,算術平均面粗さ S_a , 零点集合次元 D_z およびパワースペクトル次元 D_{PS} を示す. コーティング後に, R_a は僅かに大きくなる傾向にあり, S_a は大きくなり, 5nm 程度となる. D_z はあまり変化しない. D_{PS} は大きくなる傾向がある.

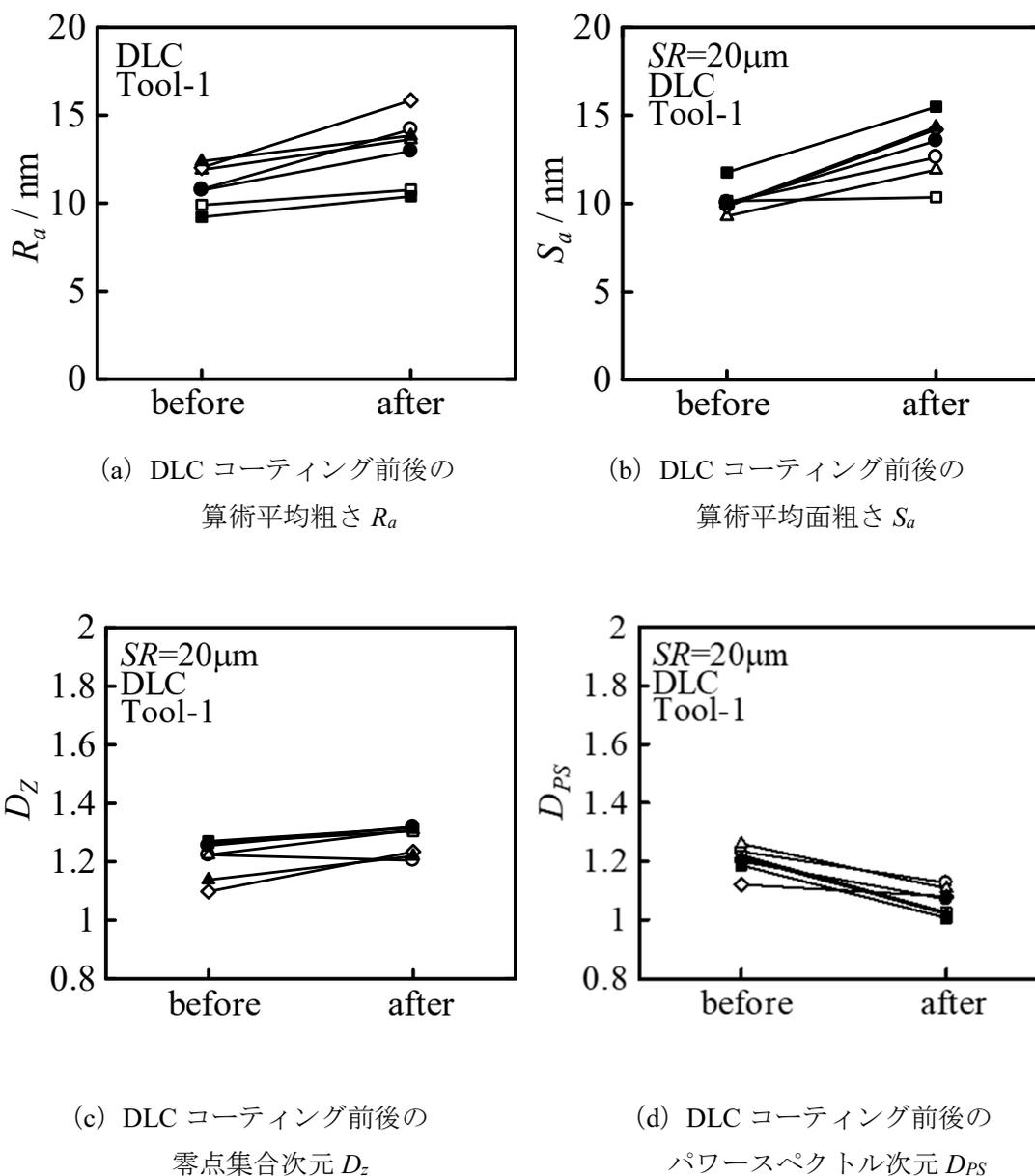
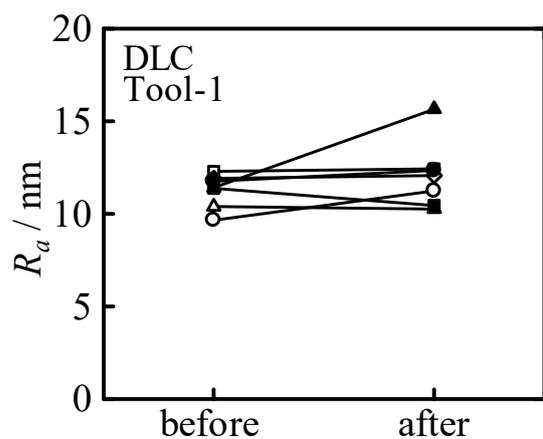
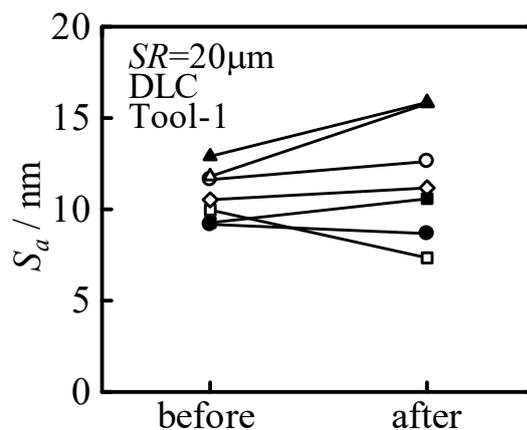


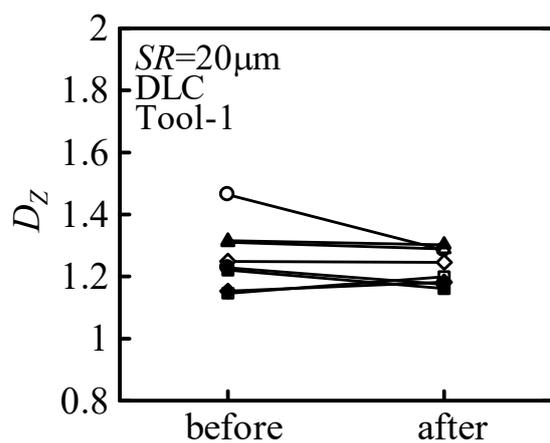
Fig.2.14 DLC コーティング工具 (Tool-1, A5052-H 圧縮用)



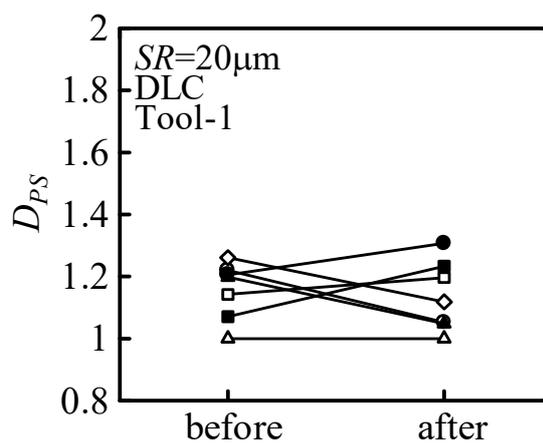
(a) DLC コーティング前後の
算術平均粗さ R_a



(b) DLC コーティング前後の
算術平均面粗さ S_a

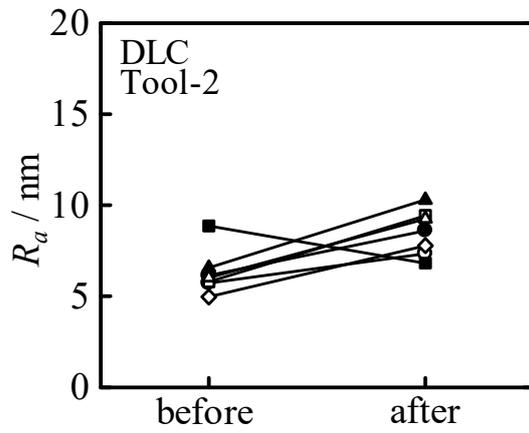


(c) DLC コーティング前後の
零点集合次元 D_z

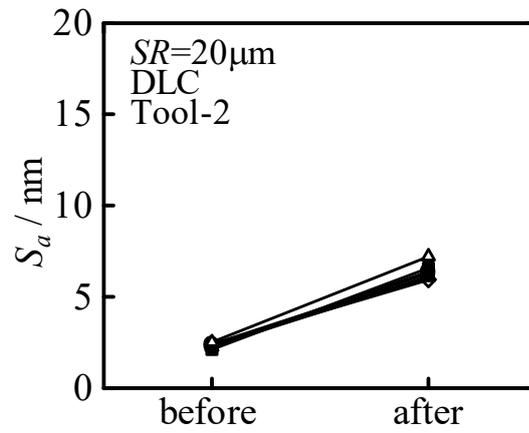


(d) DLC コーティング前後の
パワースペクトル次元 D_{PS}

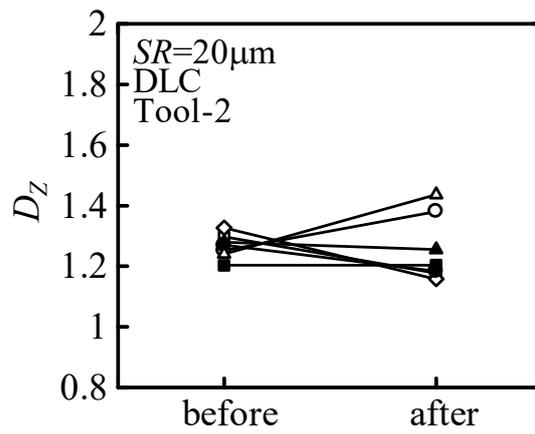
Fig.2.15 DLC コーティング工具 (Tool-1, A5052-O 圧縮用)



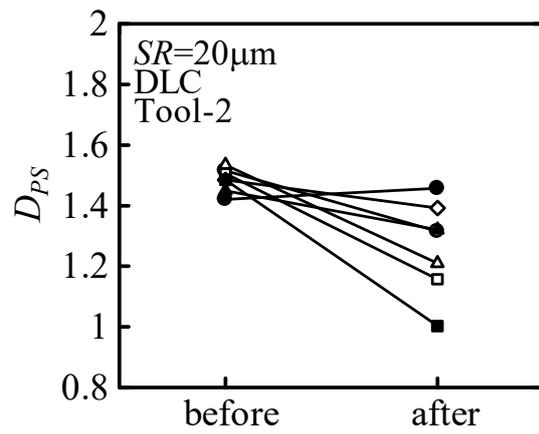
(a) DLC コーティング前後の
算術平均粗さ R_a



(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 コーティング工具 (Tool-2, A5052-H 圧縮用)

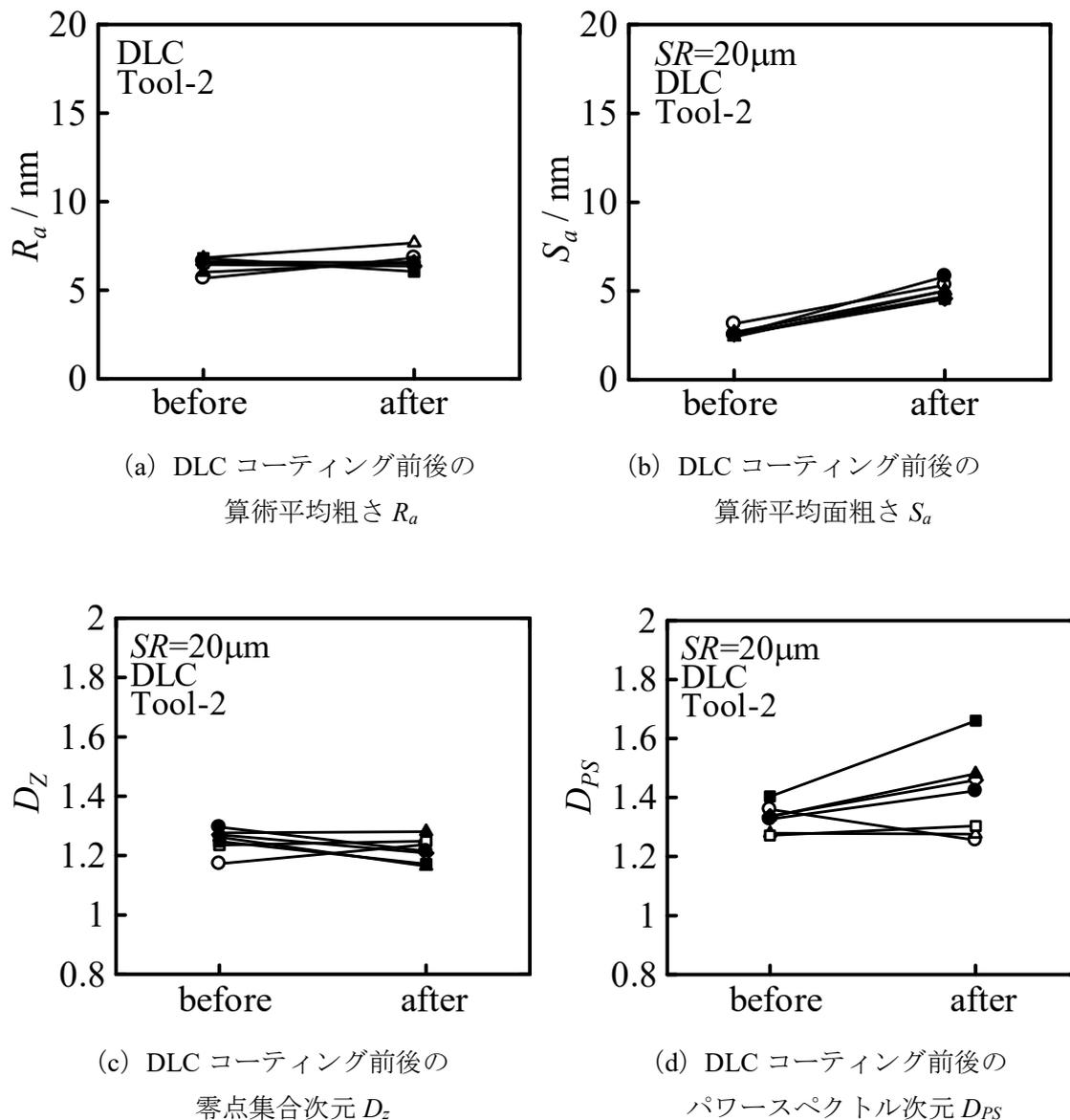


Fig.2.17 DLC コーティング工具 (Tool-2, A5052-O 圧縮用)

2.3 圧縮試験

圧縮試験では、工具表面に DLC コーティングを施し実験を行った。圧縮試験の実験手順については脇⁽²⁷⁾に基づき実験を行った。

2.3.1 圧縮試験装置

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

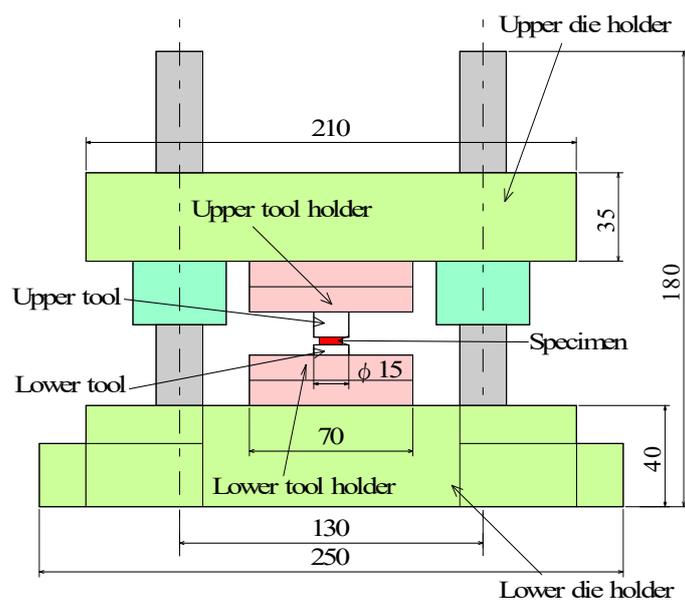


Fig.2.19 圧縮工具とダイセットの概略図

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-3830B) に接続したデジタルゲージ (ONO SOKKI 製 DIGITAL-ANALOG OUT GAUGE DG-5100) をレコーダー (YOKOGAWA 製スコープレコーダ DL350) につなぎ、出力される電圧を記録した。環状ばね型力計 (東京試験機製作所製) とブロックゲージ (MITUTOYO 製 GAGE BLOCK SET) を用いてそれぞれ出力された電圧と荷重、電圧と変位量の校正を行った。

Fig.2.20 に変位測定器 (ONO SOKKI 製 LINEAR GAUGE SENSOR GS-3830B) , Fig.2.21 にデジタルゲージ (ONO SOKKI 製 DIGITAL-ANALOG OUT GAUGE DG-5100) , Fig.2.22 に環状ばね型力計 (東京試験機製作所製) の外観を、Fig.2.23 に万能試験機に環状ばね型力計 (東京試験機製作所製) を設置し、レコーダー (YOKOGAWA 製スコープレコーダ DL350) を接続したときの外観を示す。校正については鷺⁽²⁸⁾に基づいて行った。

その結果、荷重については

245 [kN]レンジの場合：荷重[N]=242.14×出力電圧[mV]

98[kN]レンジの場合：荷重[N]=97.77×出力電圧[mV]

49[kN]レンジの場合：荷重[N]=42.629×出力電圧[mV]

24.5[kN]レンジの場合：荷重[N]=24.308×出力電圧[mV]

の関係が得られた。

変位については「変位[mm]=0.09816×出力電圧[V]」の関係が得られた。



Fig.2.20 変位測定機 (ONO SOKKI 製 LINEAR GAUGE SENSOR GS-3830B)



Fig.2.21 デジタルゲージ (ONO SOKKI 製 Digital Gauge Counter DG-5100)



Fig.2.22 環状ばね型力計の外観



Fig.2.23 環状ばね型力計設置時の外観

2.4 スコープレコーダ DL350 の使用方法

スコープレコーダ DL350 の使用方法を以下に示す。

- ① Fig.2.24 に DL350 の上面写真を示す。CH1-1 にストローク計，CH1-2 に荷重計の端子をつなぐ。
- ② Fig.2.25 に DL350 の側面写真を示す。USB コネクタにデータ保存用 USB メモリーを差す。
- ③ スコープレコーダを起動するとナビゲーション画面が表示される。Fig.2.26 にナビゲーション画面を示す。その画面でメモリーレコーダーモードを選択し，Start を押して開始する。
- ④ Fig.2.27 に画面下部にある設定画面を示す。Fig.2.27 の All Channel を押す。
- ⑤ Fig.2.28 に全チャンネル設定画面を示す。CH1-1 を Disp : ON, Label : Sr, V Range : 100V, Upper : 100.000V, Lower : -10.000V にする。
- ⑥ CH1-2 を Disp : ON, Label : P, V Range : 1000mV, Upper : 1000.00mV, Lower : -100.00mV にする。
- ⑦ CH2-1,CH2-2 を OFF にして閉じる。
- ⑧ Fig.2.27 の Condition Method をタップすると Fig.2.29 の取込設定画面が表示される。
- ⑨ 取込時間 : 30 分 00 秒, サンプル間隔 : 100ms, 取込方法 : メモリー+終了時保存にして閉じる。
- ⑩ Fig.2.27 の MENU→保存/読込→SAVE キー設定をタップすると Save キー設定画面が表示される。Fig.2.30 に Save キー設定画面を示す。
- ⑪ 波形データ保存を ON にしてバイナリ, アスキーを ON にし, オートネーミングを日付にする。
- ⑫ イメージ保存を ON にしてフォーマットを JPEG にし, オートネーミングを日付にして閉じる。
- ⑬ Fig.2.27 の MENU→表示→水平軸をタップすると表示設定画面が表示される。Fig.2.31 に表示設定画面を示す。表示時間を 5min する。
- ⑭ Fig.2.32 に DL350 の正面写真を示す。START/STOP ボタンを押し測定を開始する。
- ⑮ もう一度 START/STOP ボタン押すと測定を終了し, 記録用 USB メモリーにデータが保存される。

③-⑬の工程は設定後 MENU→保存/読込→設定データ保存で USB に保存できるため, 2 回目以降は Load を押し設定ファイルを読込実行すれば自動で②-⑮の工程が行われる(設定ファイルを読み込んだ際も②-⑮の工程が正しく設定されているか確認をする)。

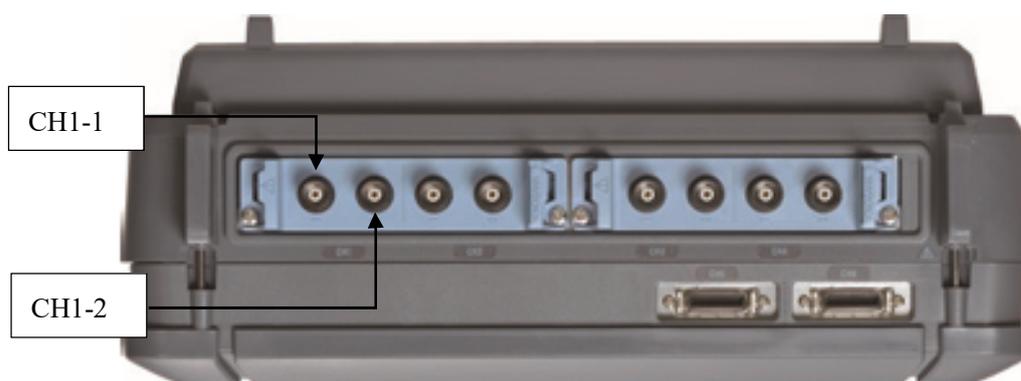


Fig.2.24 DL350 上面写真



Fig.2.25 DL350 側面写真



Fig.2.26 ナビゲーション画面



Fig.2.27 設定画面

All Channels Setup				Setup	Linear Scale	Channel Copy	Balance/Offset	Cancel	
	Disp	Label	Coupling	V Range	Band Width		Upper	Lower	Probe
All	<input checked="" type="checkbox"/>								
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Sr	DC	100V	Full		100.000V	-10.000V	10:1
2	<input checked="" type="checkbox"/>	P	DC	1000mV	Full		1000.00mV	-100.00mV	10:1
3	<input type="checkbox"/>	CH2_1	DC	500V	Full		25.00V	-25.00V	1:1
4	<input type="checkbox"/>	CH2_2	DC	500V	Full		25.00V	-25.00V	1:1
5	<input type="checkbox"/>	CH5					0.00div	x 1	Auto
6	<input type="checkbox"/>	CH6					0.00div	x 1	Auto

Fig.2.28 全チャンネル設定画面

取込時間 サンプル間隔

取込条件 START/STOPキーを押すとデータの取込を開始し、設定した取込時間後に自動的に停止します。

取込方法 データを内部メモリに取り込みます。取込停止後、そのデータをSDカードまたはUSBメモリに保存します。

スタート ↓ ↓ 終了

取込時間

(Max. 20日 00時間)

Fig.2.29 取込設定画面

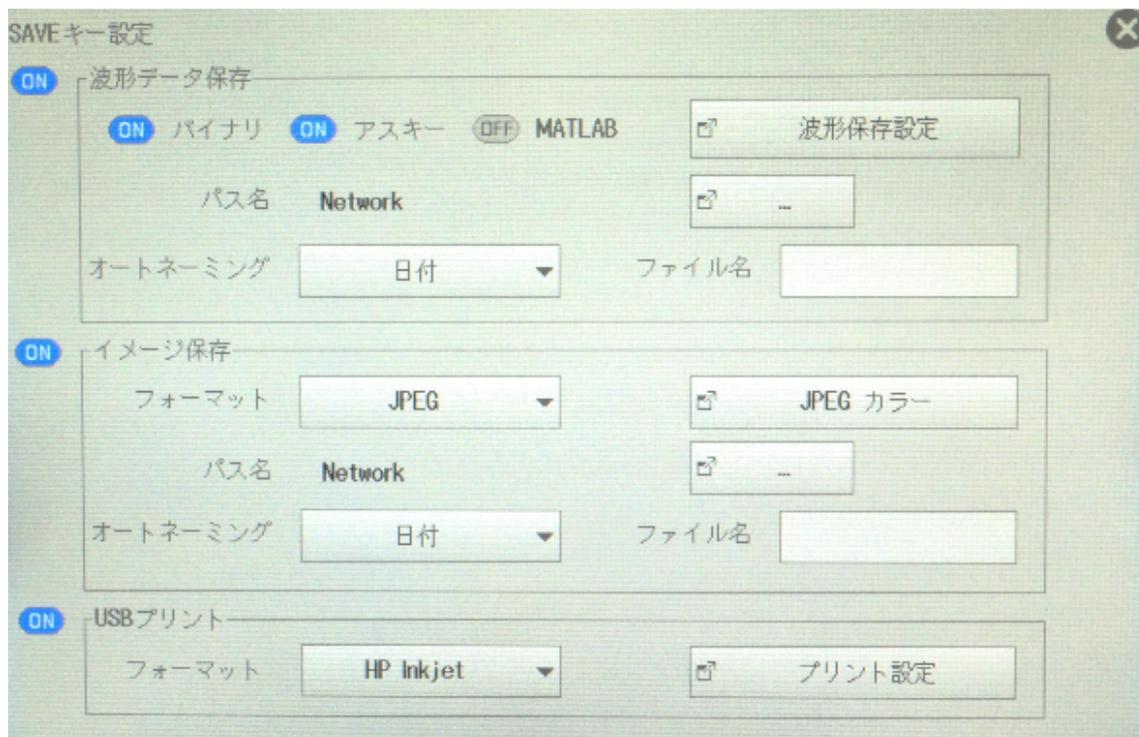


Fig.2.30 Save キー設定画面

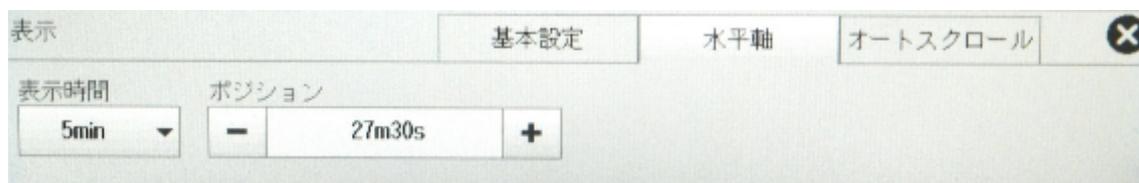


Fig.2.31 表示設定画面



Fig.2.32 DL350 正面写真

2.5 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.2.33 に示す。触針式表面粗さ計は Fig.2.34 に示すように先端半径 2~10 μm 程度の触針で表面を直接トレースし、その触針の上下を差動トランスなどで電気的な信号に変換し、出力するものである。本装置の触針は、材質がダイヤモンド、先端半径が 2 μm 、先端角度が 60°である。触針式表面粗さ計 (Surftest SJ-400) の使用方法については脇⁽²⁹⁾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.2.33 触針式表面粗さ計（Surftest SJ-400）の外観

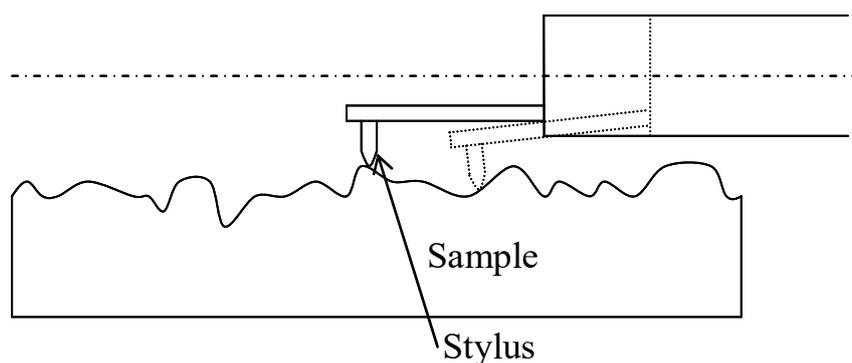


Fig.2.34 触針式表面粗さ計の原理図

2.6 原子間力顕微鏡（AFM）による観察方法⁽³⁰⁾

SPM (Scanning Probe Microscope) 装置とその周辺システムの外観写真を Fig.2.35 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⁽³¹⁾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.2.36 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.2.36 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。

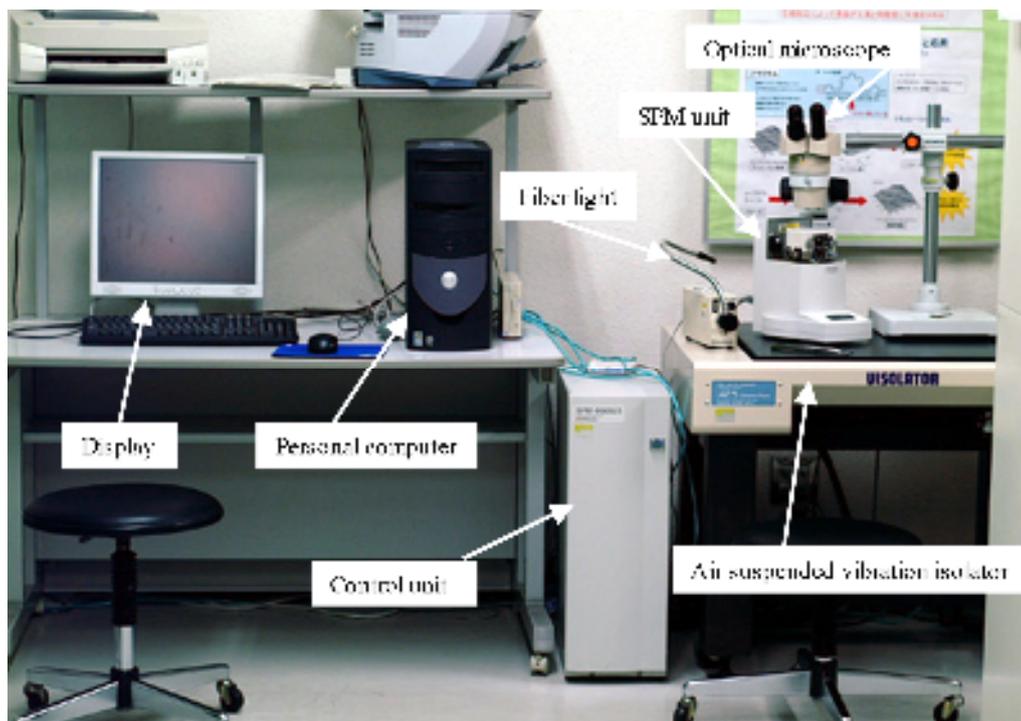


Fig.2.35 SPM 装置および周辺装置の外観

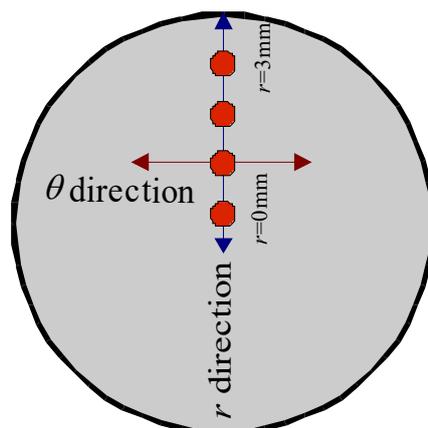


Fig.2.36 圧縮後試験片の AFM 観察を行う場所

2.7 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⁽³²⁾に基づき行った。圧縮後工具表面の外観写真を Fig.2.37 に示す。

デジタルカメラ（Nikon 製，D5100）とマイクロレンズ（Nikon 製，AF MICRO NIKKOR 60mm）を用意し，Fig.2.38 のようにコピースタンドに設置する。コピースタンド台の最奥から 15cm の位置（Fig.2.39 (a) a, b 点）にライトスタンドを設置する。両サイドのライトはライトスタンドのアームの根本から 40cm の位置（Fig.2.39 (a) c, d 点）に設置し，電球の先端がコピースタンドの 23cm のメモリの高さに合うようにした後，ライトスタンドのアームについているライト自体をそれぞれ下側に 45° に傾け設置する（Fig.2.39 (b)）。ライトスタンドのアームの根本をそれぞれ原点とし，左側のライトスタンドのアームは内側に 30°，右側のライトスタンドのアームは内側に 20° 傾け設置する。カメラはコピースタンドに固定し，スタンドの下端を 29cm に合わせて固定する（Fig.2.39 (b)）。

厚さ 1mm のガラス板を工具の下に置き，工具の直径の 3 分の 1 程度をガラス板にのせた状態で黒色のシートの上に載せ撮影し，反射板として白い紙を利用する。その様子を Fig.2.40 に示す。



Fig.2.37 圧縮後工具表面のデジタルカメラ像の一例
(DLC, Tool2, A5052-H, $e_c=49\%$)

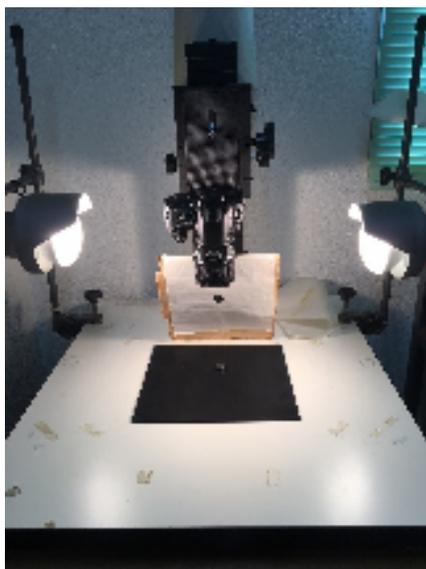
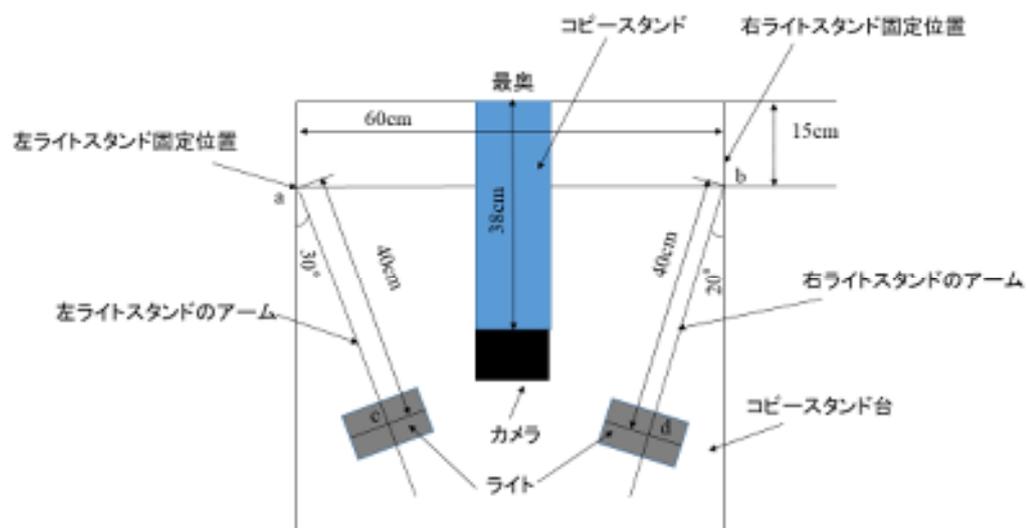
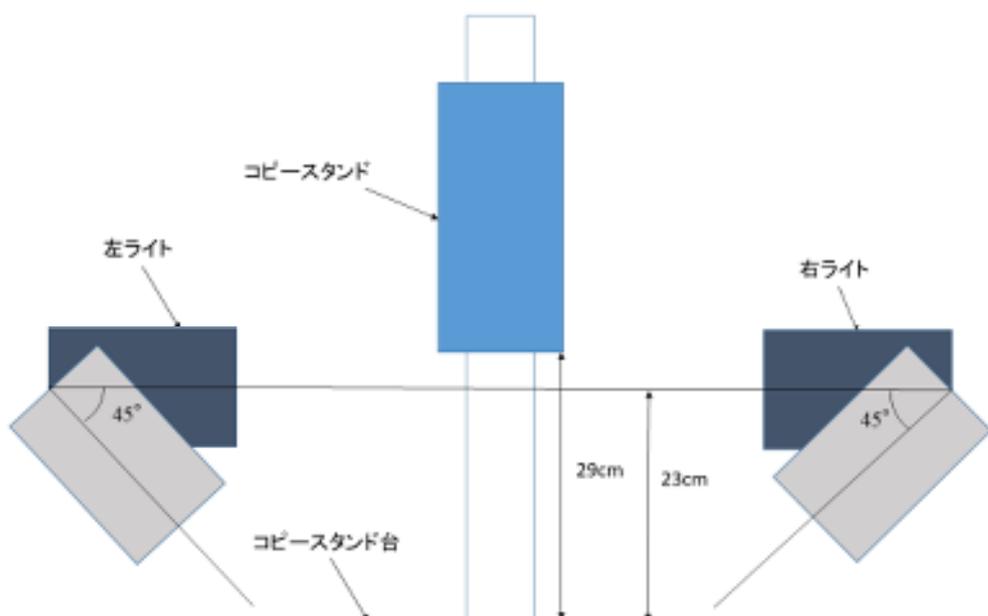


Fig.2.38 デジタルカメラをコピースタンドに設置したときの概観



(a) 上から見た様子

Fig.2.39 撮影時の照明の位置関係



(b) 正面から見た様子

Fig.2.39 撮影時の照明の位置関係

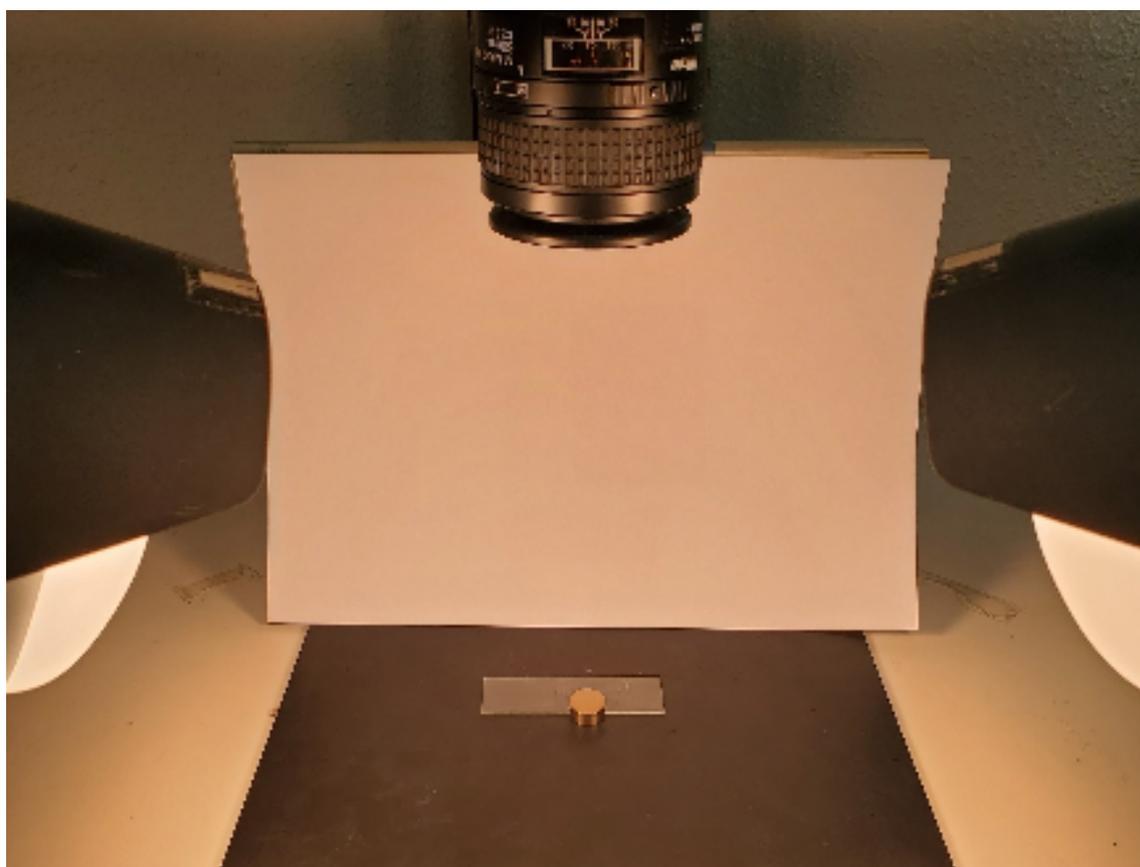


Fig.2.40 撮影の様子

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

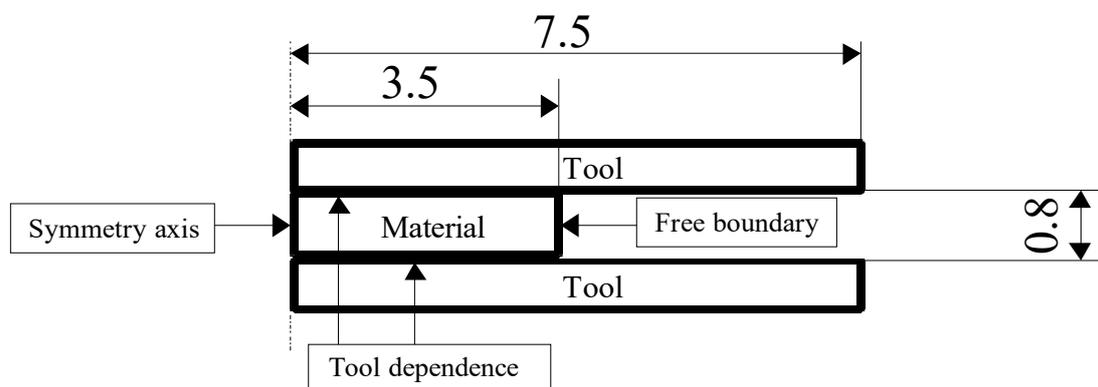


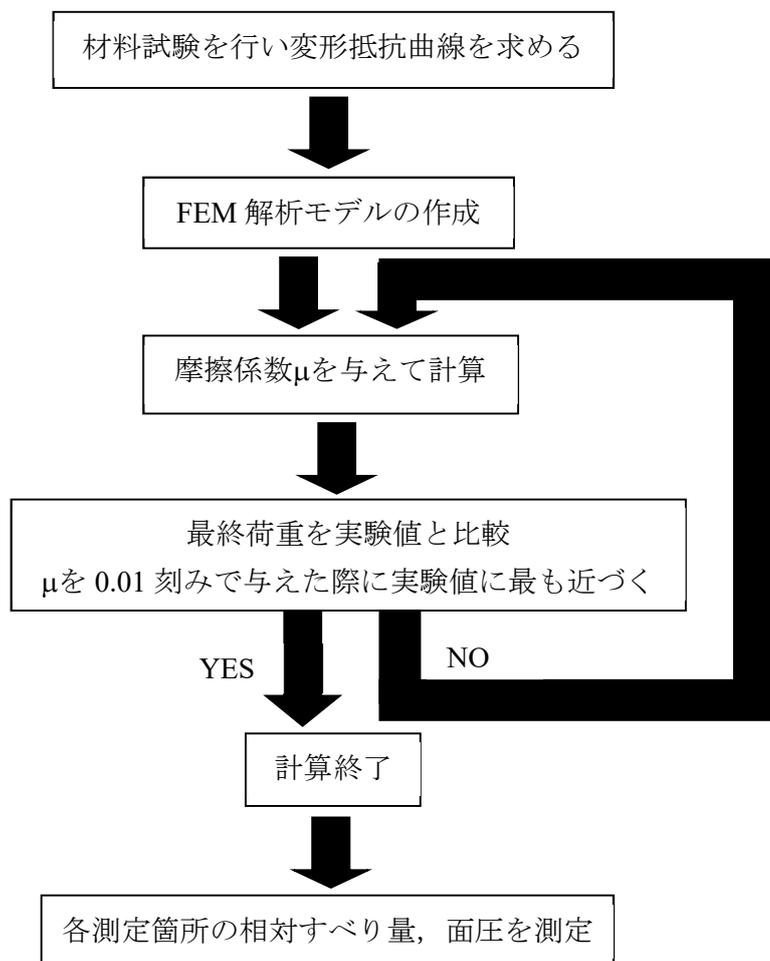
Fig.2.41 FEM 解析モデルと境界条件

Table 2.3 FEM 解析条件

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

2.8.2 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.2.42 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.2.43 に, 本研究で使用したアルミニウム試験片と銅試験片の変形抵抗曲線を示す。今回の研究では A5052-H と A5052-O の変形抵抗の測定を行い, 過去に測定した C1020 と A1050 の結果と比較した。変形抵抗については上江州⁽³³⁾に基づき測定を行った。

Fig.2.42 摩擦係数 μ の決定方法

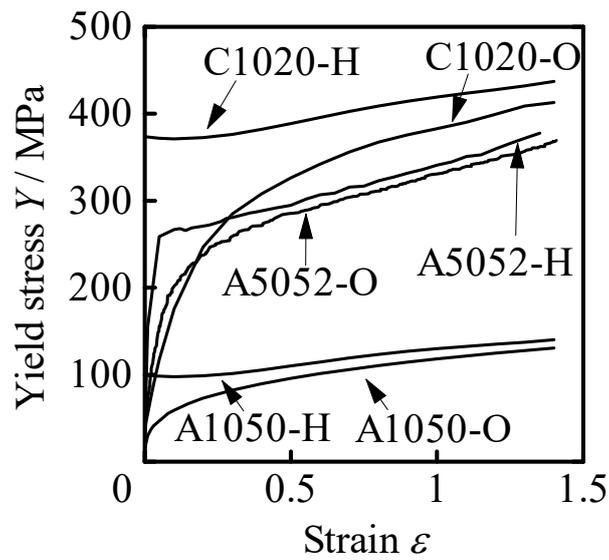


Fig.2.43 A5052, C1020, A1050 の変形抵抗曲線

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.2.44 に示すように圧縮前の試験片表面上のある点が圧縮することにより移動した移動距離を工具と材料の相対すべり量 L_S と定義し、FEM より計算した。また、FEM より工具接触面の面圧を計算し、工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係も調べた。

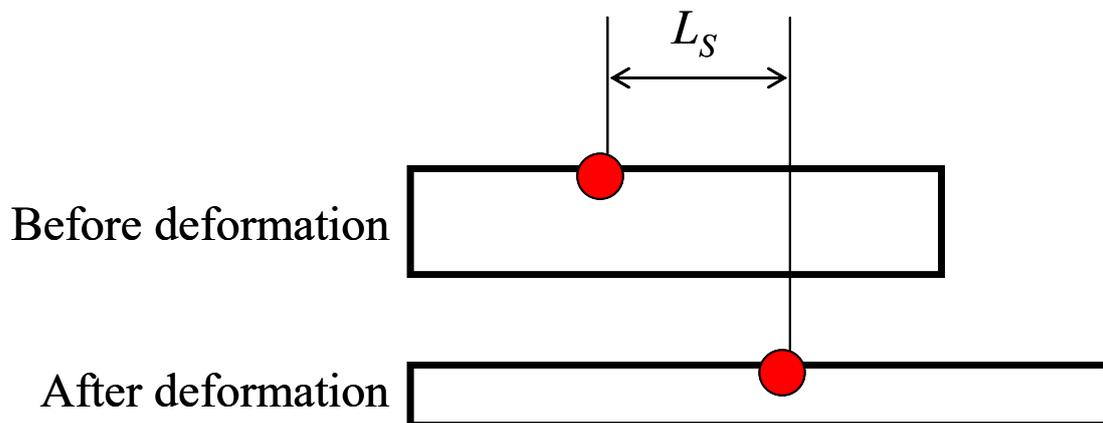


Fig.2.44 相対すべり量 L_S の定義

第3章 圧縮加工による平滑化挙動

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

本研究では、工具表面粗さ、材料、加工硬化の影響を調べるため、Table 3.2 に示すように、A5052-H と A5052-O について膜厚 100nm の DLC コーティングを施した工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) と工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) を用いた圧縮試験を行った。さらに触針式表面粗さ計、原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察、有限要素法 (FEM) 解析による変形シミュレーションを行い、工具表面粗さの影響、材料の影響、加工硬化の影響について検討した。

Table 3.1 これまでに行った圧縮試験条件

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

Table 3.2 本研究で行った圧縮試験条件

Material of specimen	Coating material of tool	Roughness of tool R_a / nm	Coating thickness of tool / nm
A5052-H	DLC	10 (Tool-1)	100
		5 (Tool-2)	
A5052-O	DLC	10 (Tool-1)	100
		5 (Tool-2)	

3.1 DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$), A5052-H における実験結果

3.1.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.1 に圧縮前と平滑化が進んでいる圧縮率 $e_c=17\%$ 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。高圧縮率においては写真のように DLC コーティングが剥離した様子が見られた。

Fig.3.3 に触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。低圧縮率においても初期試験片に比べ、 R_a が小さくなっていることがわかる。

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

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

Fig.3.4 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率が大きくなると平均面圧も大きくなる傾向が見られる。

Fig.3.5 に荷重 P と変位 S_r の関係を示す。高圧縮率においてわずかなばらつきが見られる。

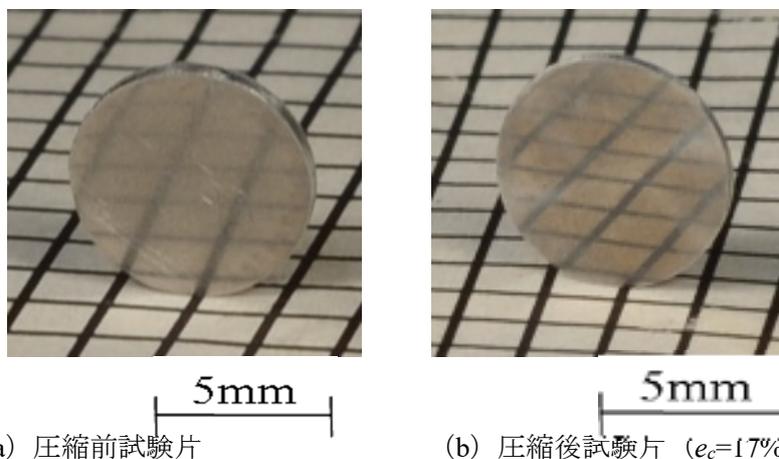


Fig.3.1 圧縮前後の試験片の外観 (DLC, Tool-1, A5052-H)

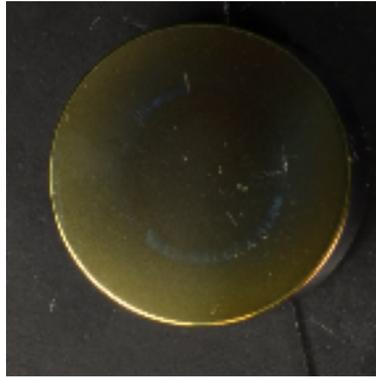


Fig.3.2 圧縮後工具表面 (DLC, Tool-1, A5052-H, $e_c=37\%$)

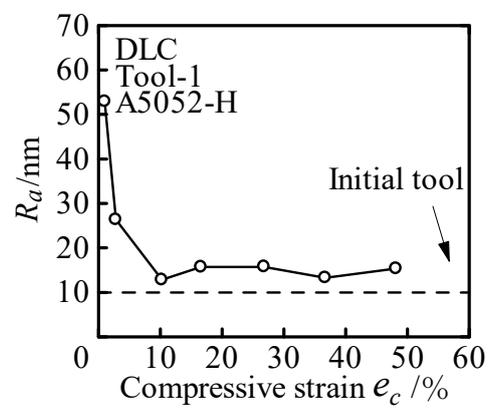


Fig.3.3 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H)

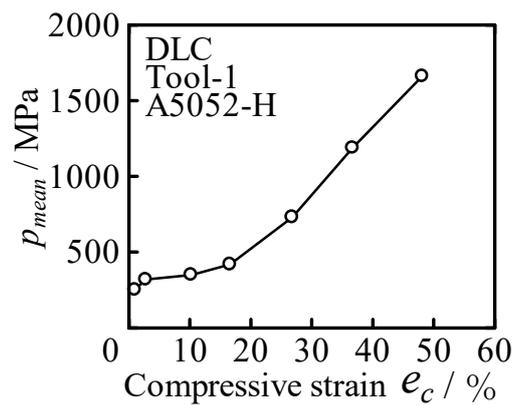


Fig.3.4 平均面圧 P_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H)

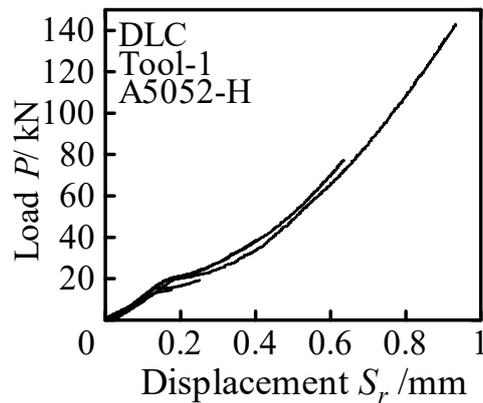


Fig.3.5 荷重 P と変位 S_r の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H)

3.1.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

AFM を用いて試験片の局所的な観察を行った。Fig.3.6 に試験片初期表面の AFM 像を、Fig.3.7 に $e_c=17\%$ に圧縮した試験片の AFM 像を示す。画像より、外周部では r 方向に材料流動した様子が見られる。

Fig.3.8 に AFM により得られた算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率による S_a の変化は小さく、いずれの圧縮率においても中心部よりも外周部のほうが平滑化される傾向がある。

Fig.3.9 に圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。低圧縮と高圧縮のどちらにおいても中心部より外周部のほうが平滑化が進むことがわかる。

Fig.3.10 に測定箇所 $r=1\text{mm}$ 、Fig.3.11 に測定箇所 $r=3\text{mm}$ での算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係を示す。 $e_c=1\%$ のみ、 r 方向の方が R_{ae} が小さくなっている。これは、 r 方向では材料流動によるしごき効果により θ 方向に比べて平滑化が進んでいるためであると考えられる。

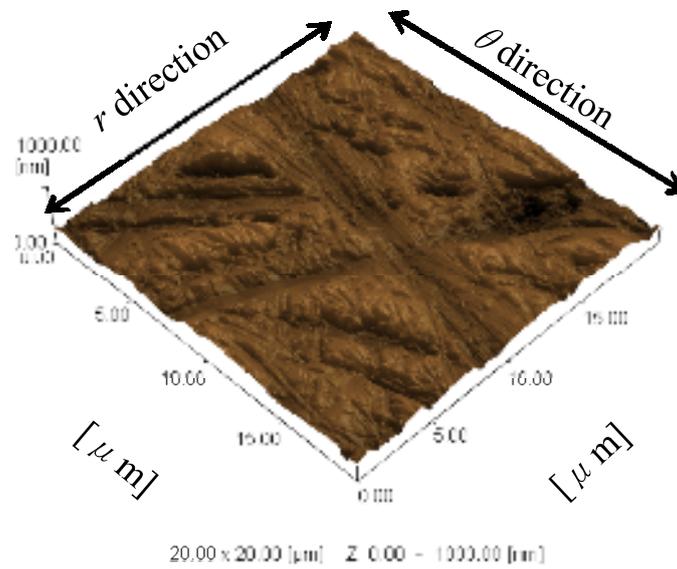
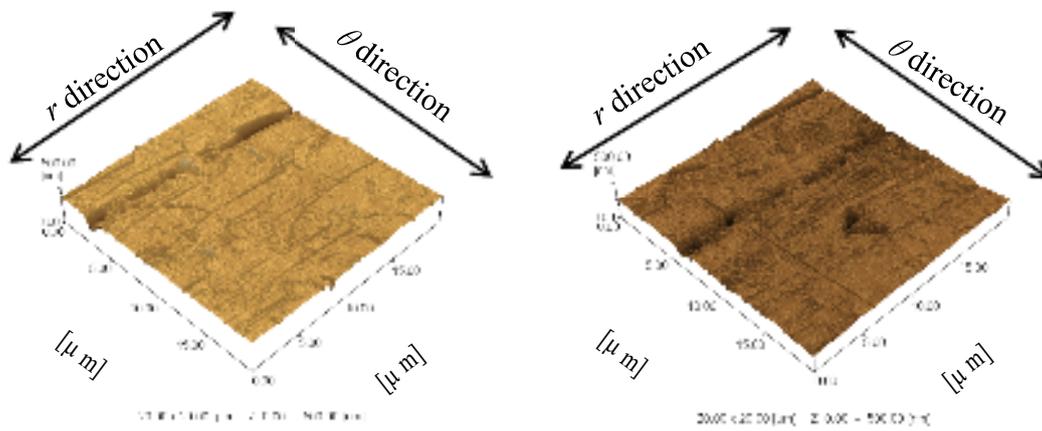


Fig.3.6 初期試験片表面のAFM像の例 ($e_c=0\%$, $SR=20\mu\text{m}$)



(a) 測定箇所 $r=0\text{mm}$

(b) 測定箇所 $r=1\text{mm}$

Fig.3.7 圧縮試験後の試験片表面のAFM像
(DLC, Tool-1, A5052-H, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=17\%$)

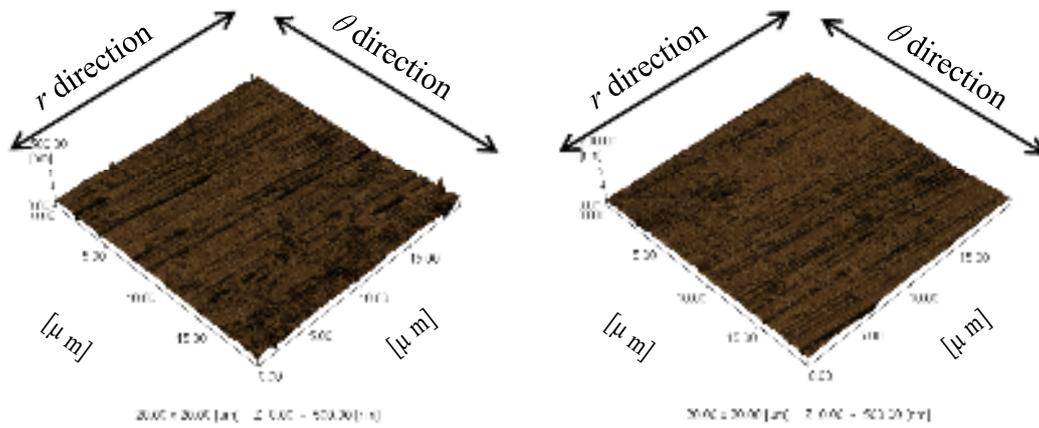
(c) 測定箇所 $r=2\text{mm}$ (d) 測定箇所 $r=3\text{mm}$

Fig.3.7 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像
(DLC, Tool-1, A5052-H, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=17\%$)

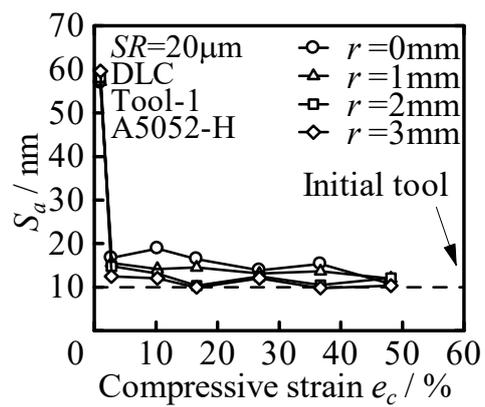


Fig.3.8 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H)

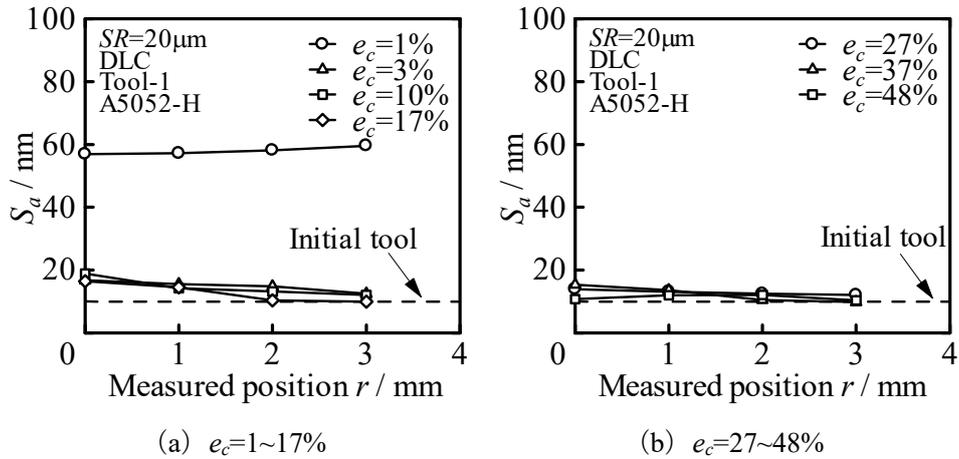


Fig.3.9 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H)

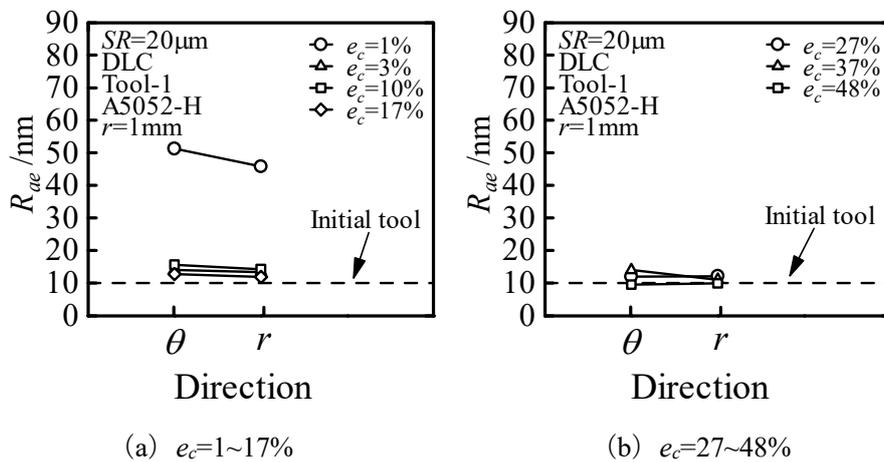


Fig.3.10 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H, $r=1\text{ mm}$)

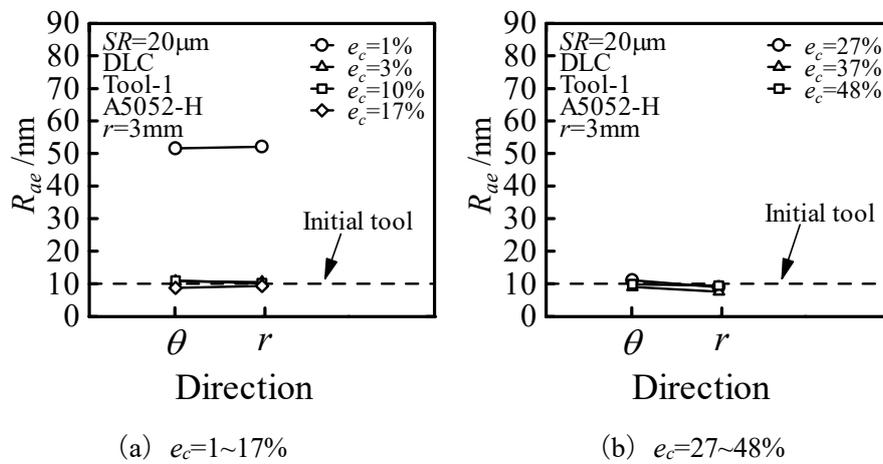


Fig.3.11 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H, $r=3\text{ mm}$)

3.1.3 有限要素法 (FEM) 解析結果.

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

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

ここで, S_r : レコーダ出力の変位, DS : 総弾性変形量 (行程最後のレコーダ出力の変位 - (圧縮前の試験片の高さ(実測値) - 圧縮後の試験片の高さ(実測値))), P_{MAX} : 行程最後の荷重, P : 行程 S_r での荷重である. なお, 圧縮率 $e_c=1\%$, 3% , 37% , 48% については FEM において本ソフトウェアで設定できる最大摩擦係数 $\mu=0.577$ にして計算した最終荷重よりも, 実験値が大きくなったため, それ以外の結果のみ考察を行う. 加工初期を除き, 計算結果と実験結果はおおむね一致している.

Fig.3.13 に FEM 解析による変形の様子を示す. 中心部の相対すべり量は小さく, 外周部ほど相対すべり量が大きくなる傾向がある. また, 各実験における最終荷重と一致するように決定した摩擦係数 μ は $0.07\sim 0.19$ となっており摩擦係数 μ にばらつきがあることから, 各実験での潤滑条件は違いがあると考えられる.

Fig.3.14 に FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す. 圧縮率が大きくなると面圧, すべり量ともに大きくなるのがわかる. また, すべり量 L_S が大きくなるほど面圧が小さくなるのがわかる.

Fig.3.15 に算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す. いずれの圧縮率においてもすべり量が大きくなると S_a が小さくなるのがわかる.

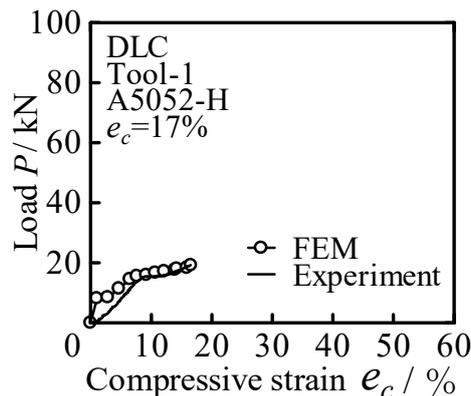


Fig.3.12 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H, $e_c=17\%$)

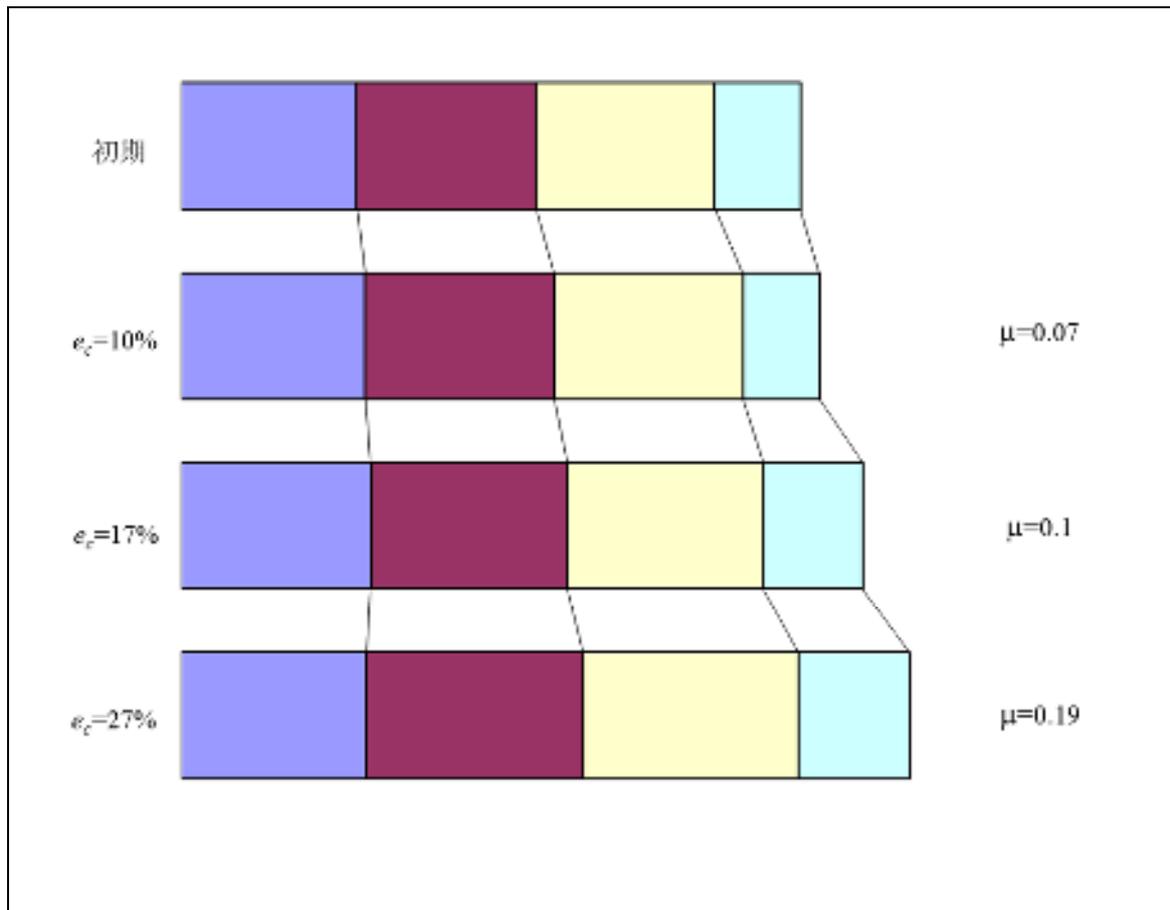


Fig.3.13 FEM 解析による変形の様子
 ($e_c=10\% : \mu=0.07$, $e_c=17\% : \mu=0.10$, $e_c=27\% : \mu=0.19$)

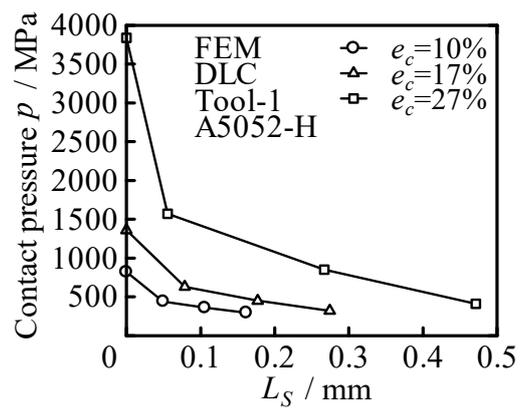


Fig.3.14 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H)

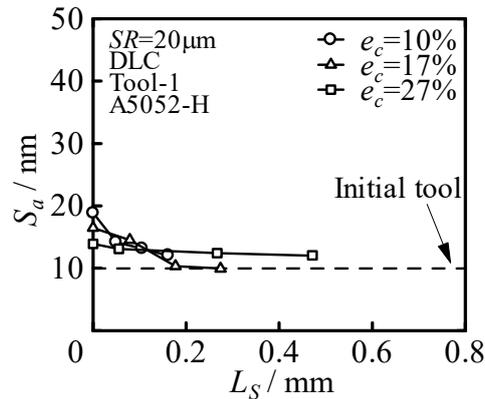


Fig.3.15 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H)

3.2 DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$), A5052-H における実験結果

3.2.1 圧縮率と表面粗さの関係

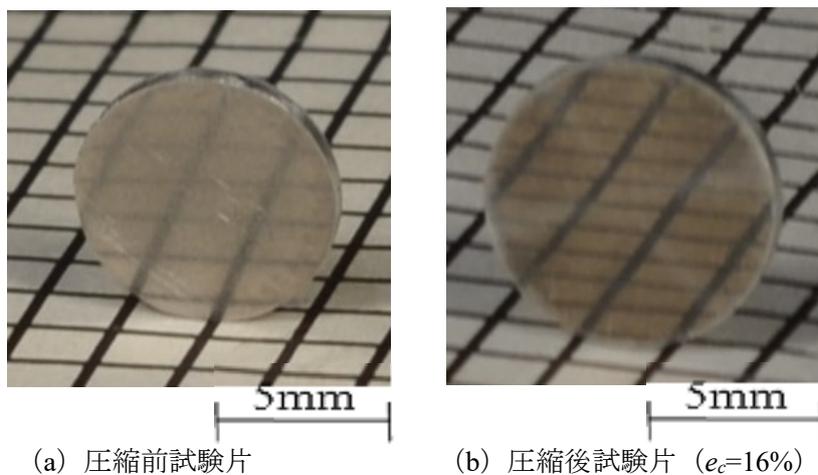
Fig.3.16 に圧縮前と平滑化が進んでいる圧縮率 $e_c=16\%$ の試験片の外観を示す。圧縮加工により試験片表面が鏡面化された様子がわかる。

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

Fig.3.18 に触針式表面粗さ計より得られた算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの圧縮率においても初期工具表面粗さ程度までは平滑化が進まない。

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

Fig.3.20 に荷重 P とレコーダー出力変位 S_r の関係を示す。低圧縮率でわずかなばらつきが見られるが、それ以外で大きな違いは見られない。



(a) 圧縮前試験片

(b) 圧縮後試験片 ($e_c=16\%$)

Fig.3.16 圧縮前後の試験片の外観 (DLC, Tool-2, A5052-H)



Fig.3.17 圧縮後工具表面 (DLC, Tool-2, A5052-H, $e_c=37\%$)

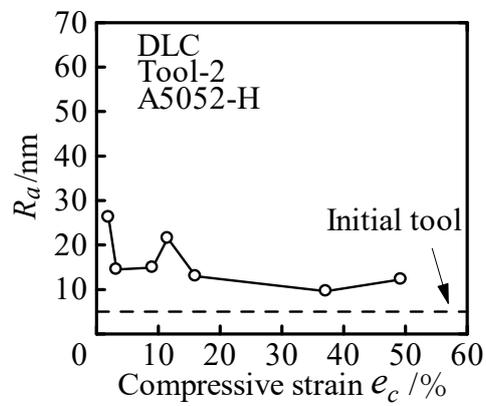


Fig.3.18 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H)

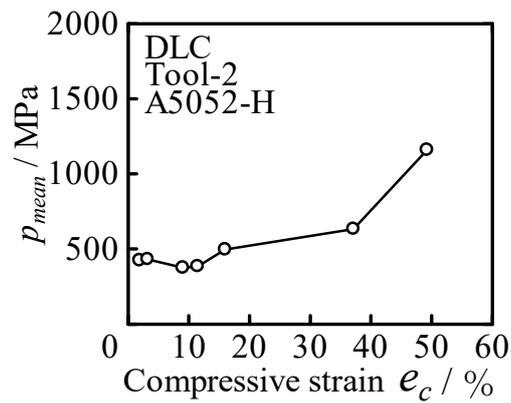


Fig.3.19 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H)

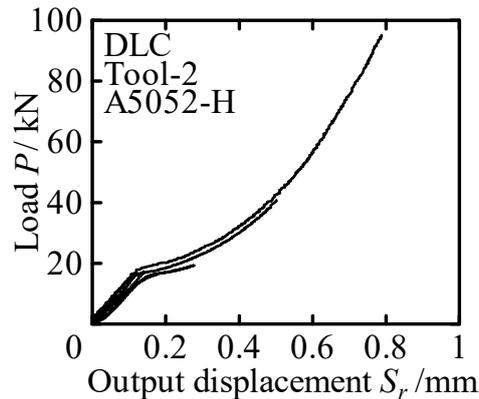


Fig.3.20 荷重 P とレコーダー出力変位 S_r の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H)

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.3.21 に試験片初期表面の AFM 像を、Fig.3.22 に $e_c=16\%$ に圧縮した試験片の AFM 像を示す。画像より、中心部より外周部のほうが r 方向に材料流動していることがわかる。

Fig.3.23 に AFM により得られた算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率が大きくなるにつれて S_a が小さくなり、圧縮率 16% 以上では大きな差は見られない。低圧縮率では中心部よりも外周部の方が S_a が小さくなる傾向が見られるが、高圧縮率では大きな差は見られない。

Fig.3.24 に圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。低圧縮率では中心部よりも外周部の方が S_a が小さくなる傾向が見られるが、高圧縮率では大きな差は見られない。

Fig.3.25 に測定箇所 $r=1\text{mm}$ 、Fig.3.26 に測定箇所 $r=3\text{mm}$ での算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係を示す。 $r=3\text{mm}$ の $e_c=2\%$ のみ、 r 方向の方が R_{ae} が小さくなっている。これは、 r 方向では材料流動によるしごき効果により θ 方向に比べて平滑化が進んでいるためであると考えられる。

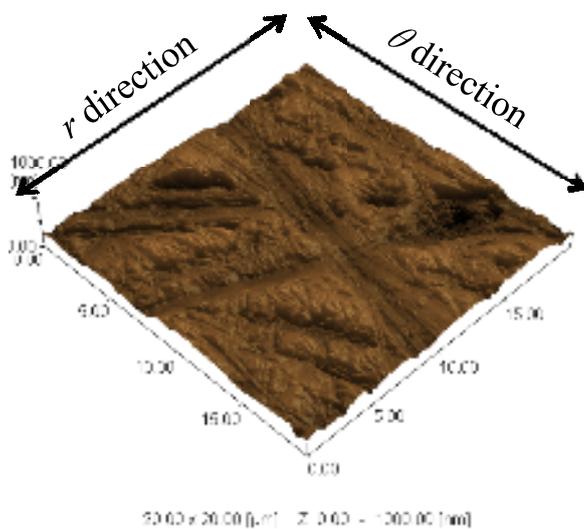
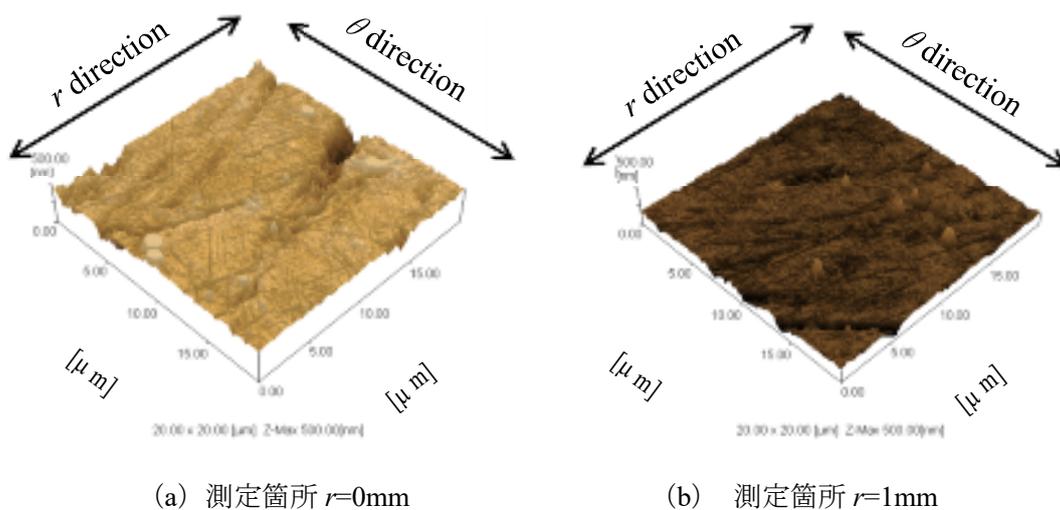


Fig.3.21 初期試験片表面の AFM 像の例 ($SR=20\mu\text{m}$, $e_c=0\%$)



(a) 測定箇所 $r=0\text{mm}$

(b) 測定箇所 $r=1\text{mm}$

Fig.3.22 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像
(DLC, Tool-2, A5052-H, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=11\%$)

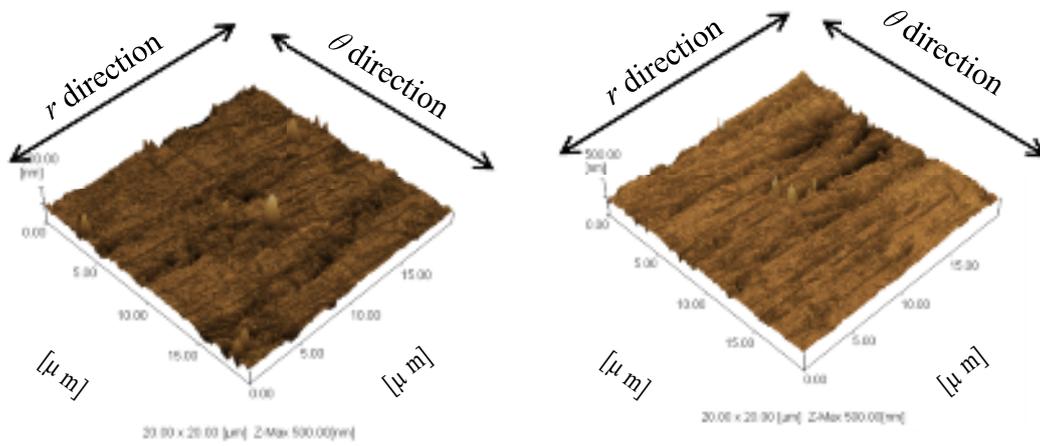
(c) 測定箇所 $r=2\text{mm}$ (d) 測定箇所 $r=3\text{mm}$

Fig.3.22 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像
(DLC, Tool-2, A5052-H, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=11\%$)

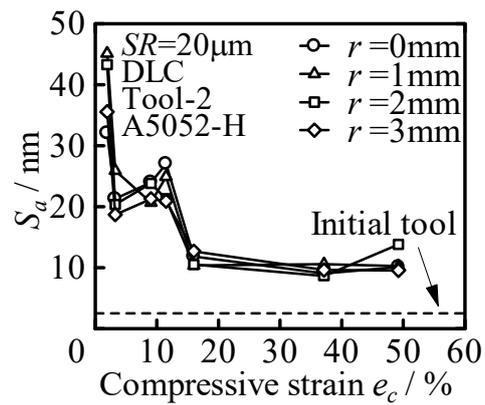


Fig.3.23 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H)

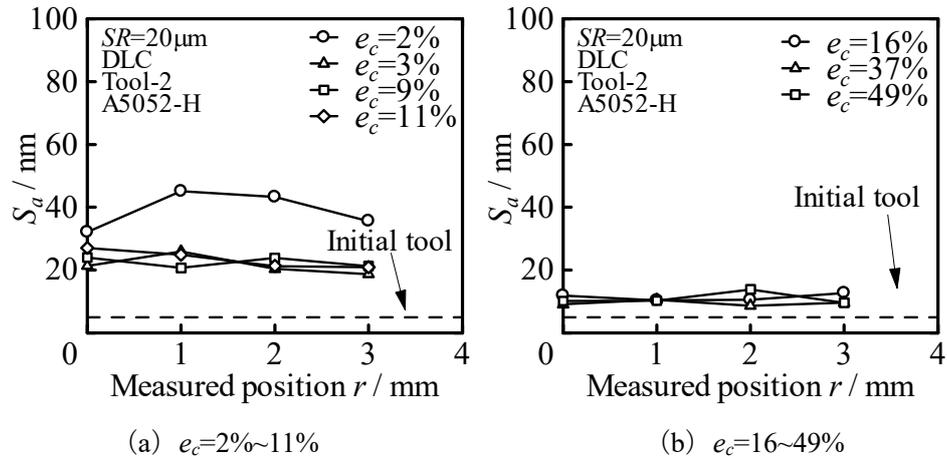


Fig.3.24 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H)

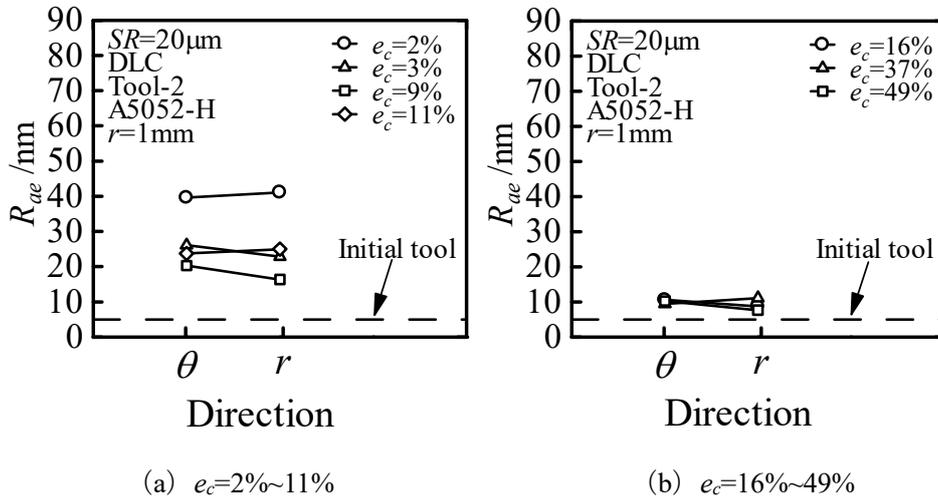


Fig.3.25 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H, $r=1\text{mm}$)

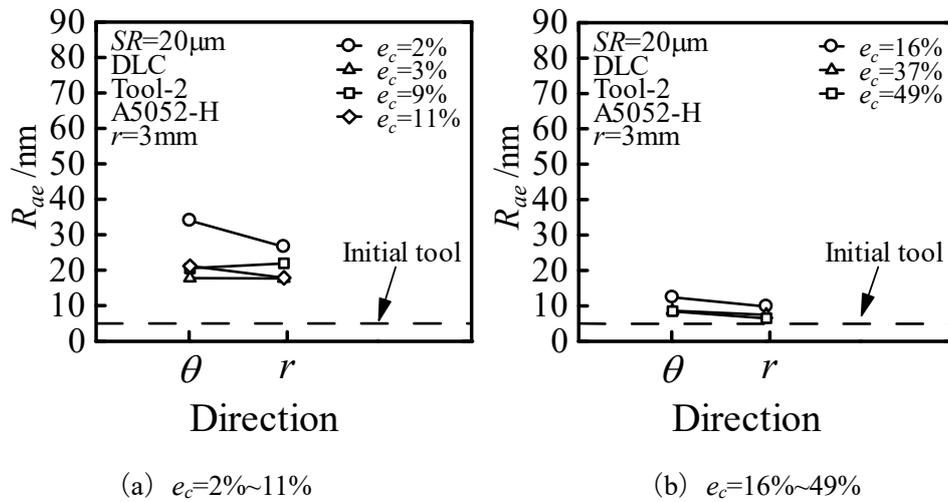


Fig.3.26 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H, $r=3\text{mm}$)

3.2.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

3.1.3 と同様に FEM 解析を行った。Fig.3.27 に FEM における荷重 P と圧縮率 e_c の関係の例を示す。なお、圧縮率 $e_c=2\%$, 3% については FEM において本ソフトウェアで設定できる最大摩擦係数 $\mu=0.577$ にして計算した最終荷重よりも、実験値が大きくなったため、それ以外の結果のみ考察を行う。加工初期を除き実験結果と FEM 結果はおおむね一致している。

Fig.3.28 に FEM 解析による変形の様子を示す。中心部の相対すべり量は小さく、外周部ほど相対すべり量が大きくなる傾向がある。また、各実験における最終荷重と一致するように決定した摩擦係数 μ は $0.1 \sim 0.18$ となっている。各実験での潤滑条件は違いがあると考えられる。

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

Fig.3.30 に算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係を示す。低圧縮率ではすべり量が大きくなると S_a が小さくなる傾向がみられる。高圧縮率ではすべり量による大きな違いは見られない。

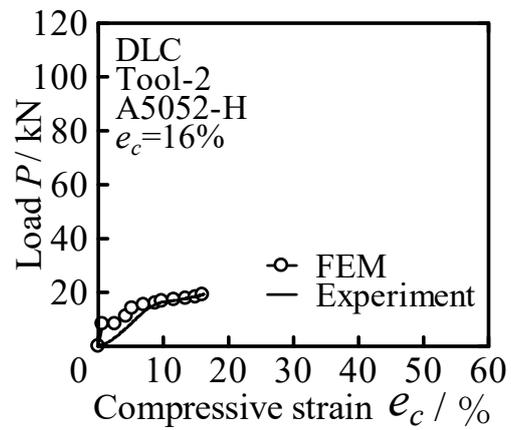


Fig.3.27 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H, $e_c=11\%$)

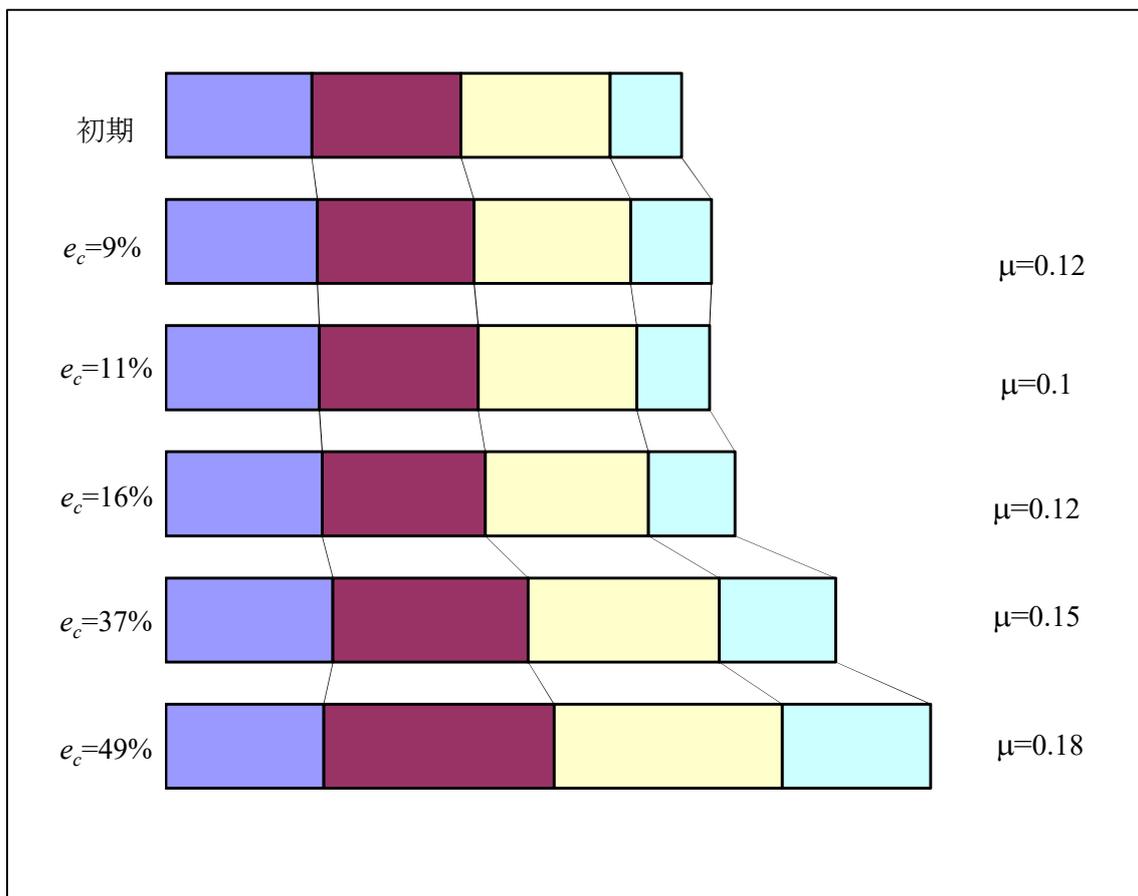


Fig.3.28 FEM 解析による変形の様子

($e_c=9\% : \mu=0.12$, $e_c=11\% : \mu=0.10$, $e_c=16\% : \mu=0.12$, $e_c=37\% : \mu=0.15$, $e_c=49\% : \mu=0.18$)

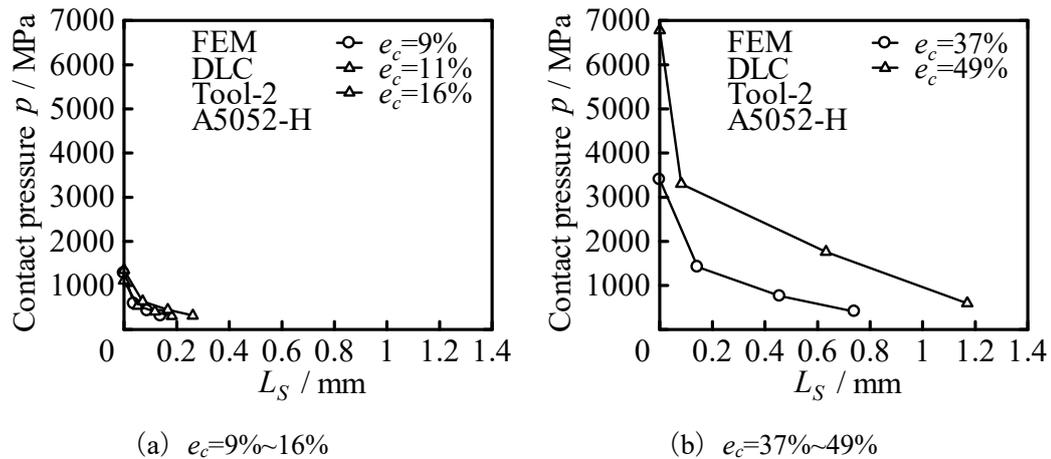


Fig.3.29 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H)

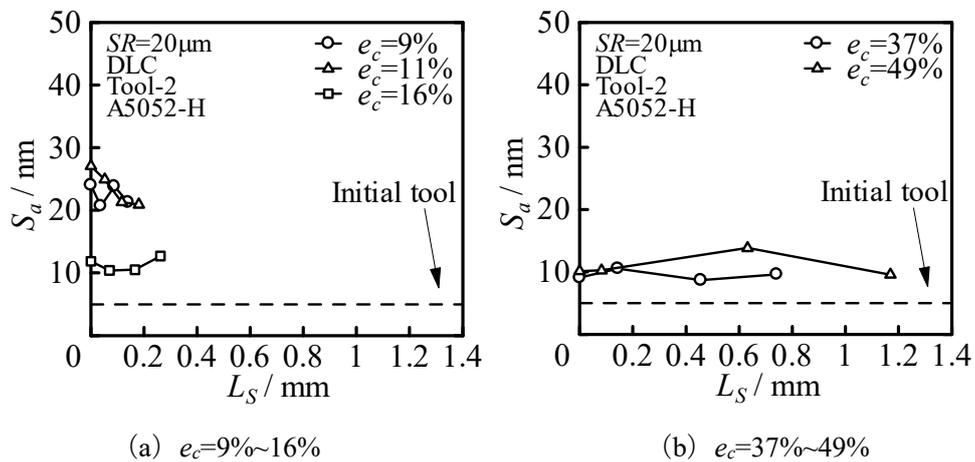


Fig.3.30 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H)

3.3 DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$), A5052-O における実験結果

3.3.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.31 に圧縮前と平滑化が進んでいる圧縮率 $e_c=31\%$ の試験片の外観を示す。圧縮加工により試験片表面が鏡面化された様子がわかる。

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

Fig.3.33 に触針式表面粗さ計より得られた算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率 10%までに平滑化が進み、初期工具表面粗さ程度まで平滑化され、それ以降において平滑化は進まない。

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

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

違いは見られない。

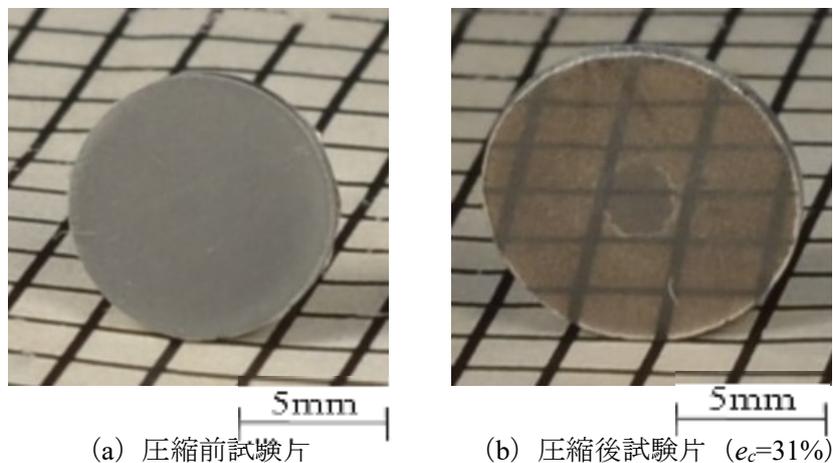


Fig.3.31 圧縮前後の試験片の外観 (DLC, Tool-1, A5052-O)



Fig.3.32 圧縮後工具表面 (DLC, Tool-1, A5052-O, $e_c=31\%$)

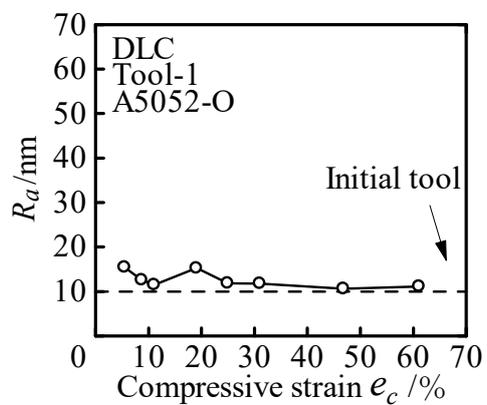


Fig.3.33 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O)

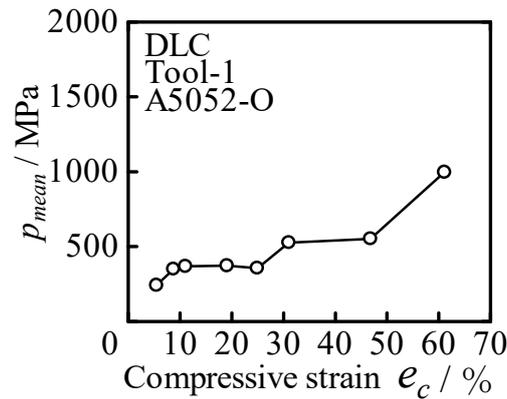


Fig.3.34 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O)

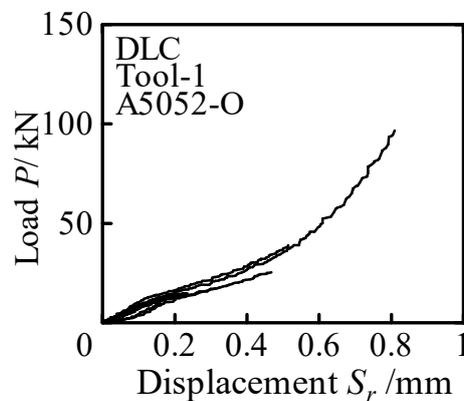


Fig.3.35 荷重 P とレコーダー出力変位 S_r の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O)

3.3.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

AFM を用いて試験片の局所的な観察を行った. Fig.3.36 に試験片初期表面の AFM 像を, Fig.3.37 に $e_c=31\%$ に圧縮した試験片の AFM 像を示す. 画像より, 中心部より外周部のほうが r 方向に材料流動していることがわかる.

Fig.3.38 に AFM により得られた算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 圧縮率が大きくなるにつれて S_a が小さくなり, 圧縮率 10% 以上では大きな差は見られない. 低圧縮率では中心部よりも外周部の方が S_a が小さくなる傾向が見られるが, 高圧縮率では大きな差は見られない.

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

Fig.3.40 に測定箇所 $r=1\text{mm}$, Fig.3.41 に測定箇所 $r=3\text{mm}$ での算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係を示す. 低圧縮率では, r 方向の方が R_{ae} がわずかに小さくなっている. これは, r 方向では材料流動によるしごき効果により θ 方向に比べて平滑化が進んでいるためで

あると考えられる。

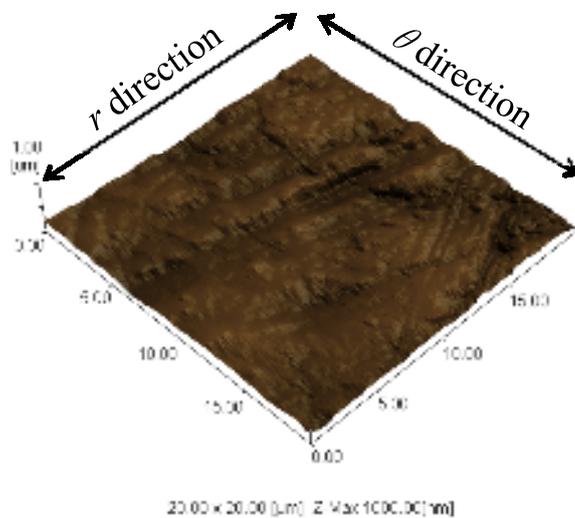
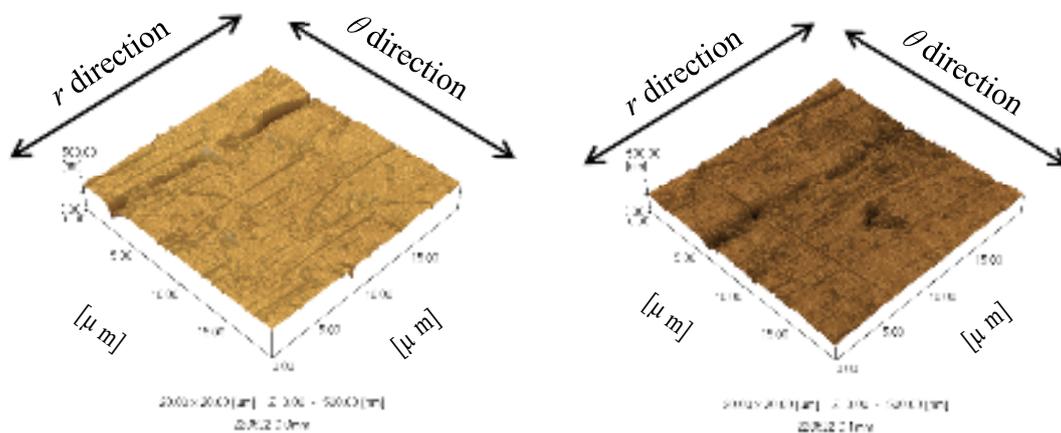


Fig.3.36 初期試験片表面の AFM 像の例 ($SR=20\mu\text{m}$, $e_c=0\%$)



(a) 測定箇所 $r=0\text{mm}$

(b) 測定箇所 $r=1\text{mm}$

Fig.3.37 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像
(DLC, Tool-1, A5052-O, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=31\%$)

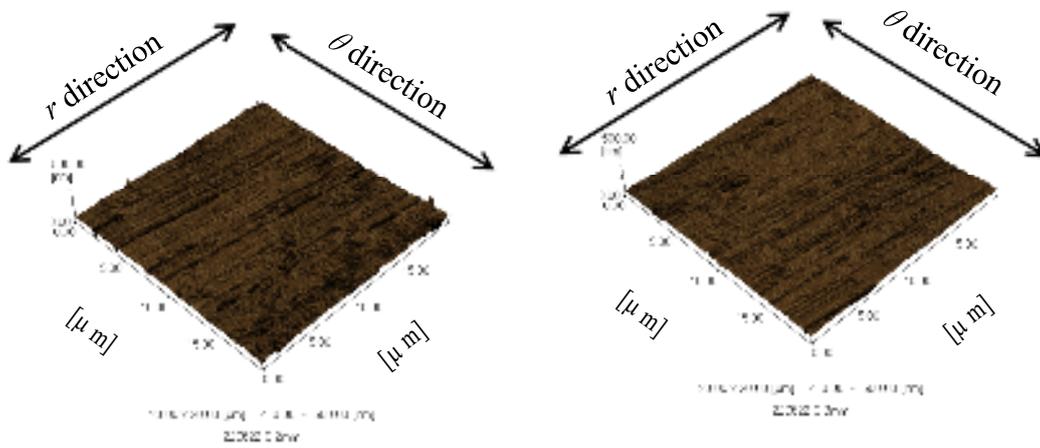
(c) 測定箇所 $r=2\text{mm}$ (d) 測定箇所 $r=3\text{mm}$

Fig.3.37 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像
(DLC, Tool-1, A5052-O, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=31\%$)

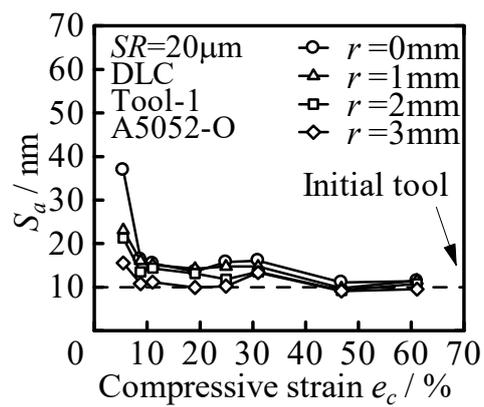


Fig.3.38 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O)

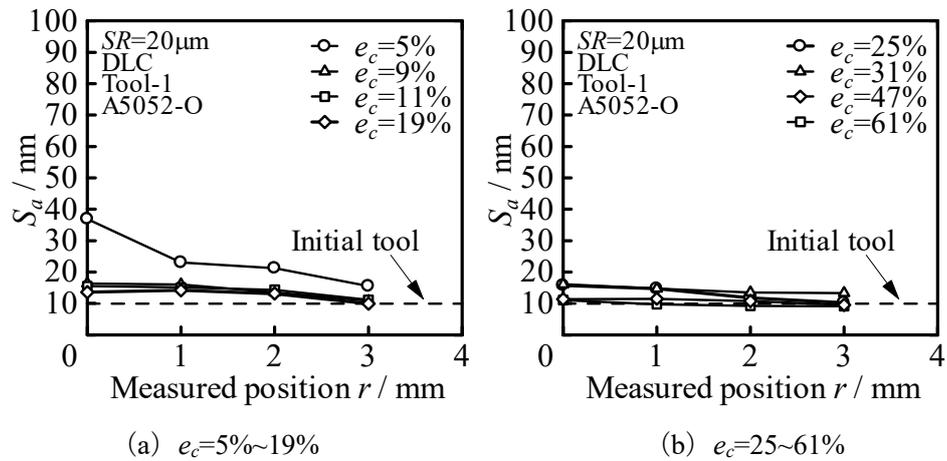


Fig.3.39 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O)

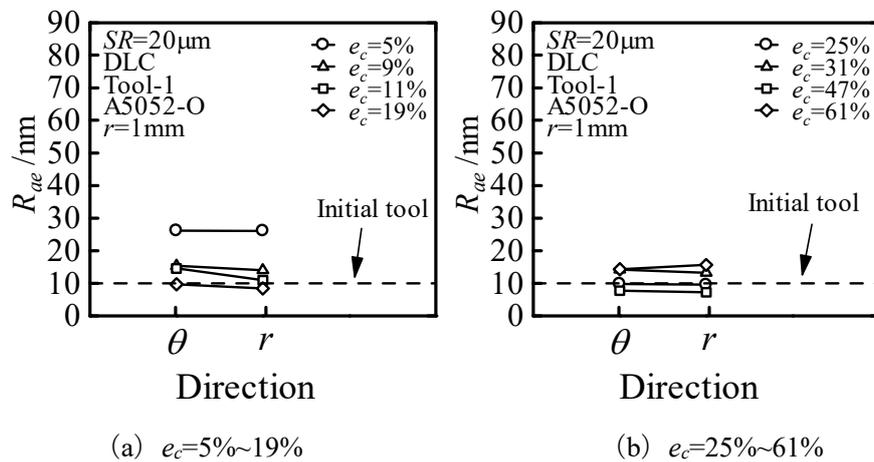


Fig.3.40 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O, $r=1\text{mm}$)

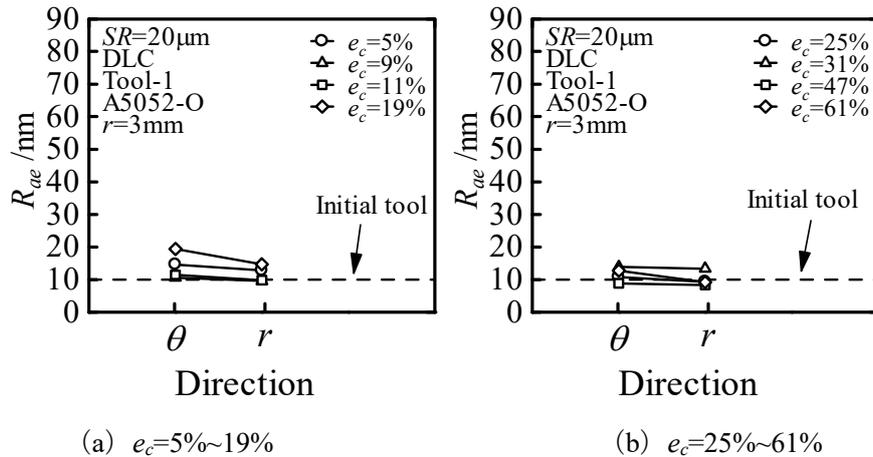


Fig.3.41 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O, $r=3\text{mm}$)

3.3.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

3.1.3 と同様に FEM 解析を行った。Fig.3.42 に FEM における荷重 P と圧縮率 e_c の関係の例を示す。加工初期を除き実験結果と FEM 結果はおおむね一致している。

Fig.3.43 に FEM 解析による変形の様子を示す。中心部の相対すべり量は小さく、外周部ほど相対すべり量が大きくなる傾向がある。また、各実験における最終荷重と一致するように決定した摩擦係数 μ は 0.07~0.2 となっている。各実験での潤滑条件は違いがあると考えられる。

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

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

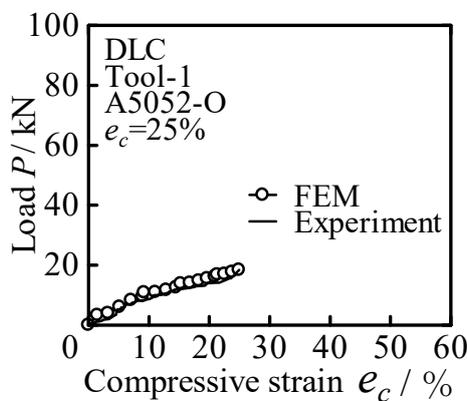


Fig.3.42 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O, $e_c=25\%$)

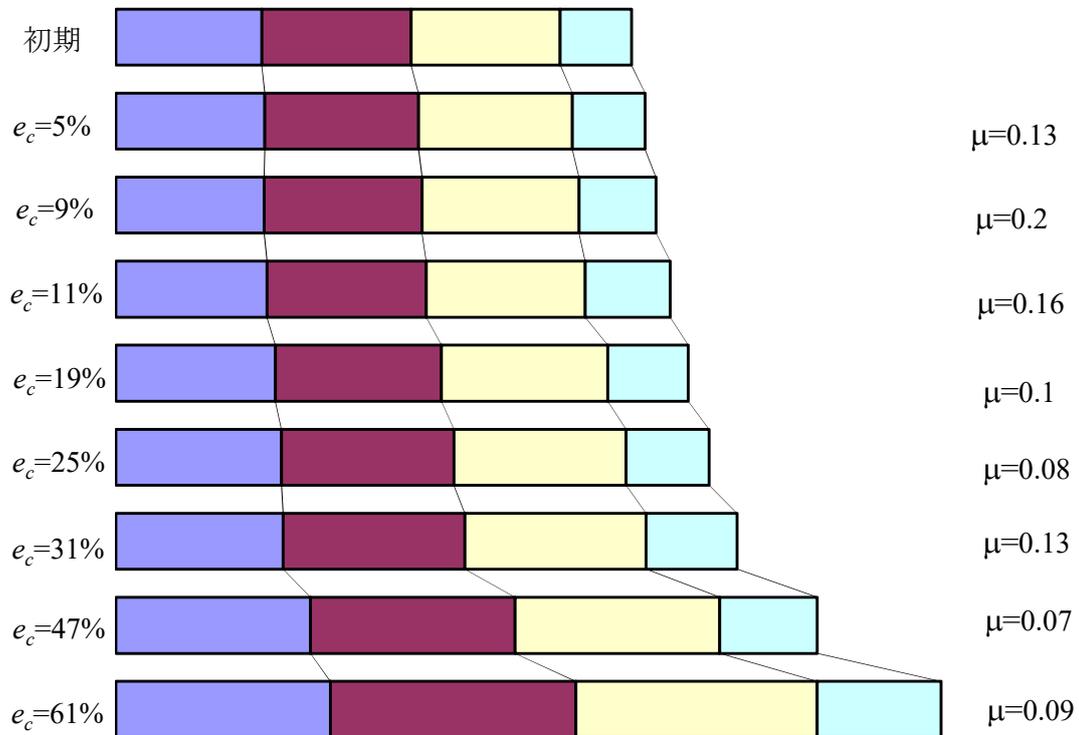
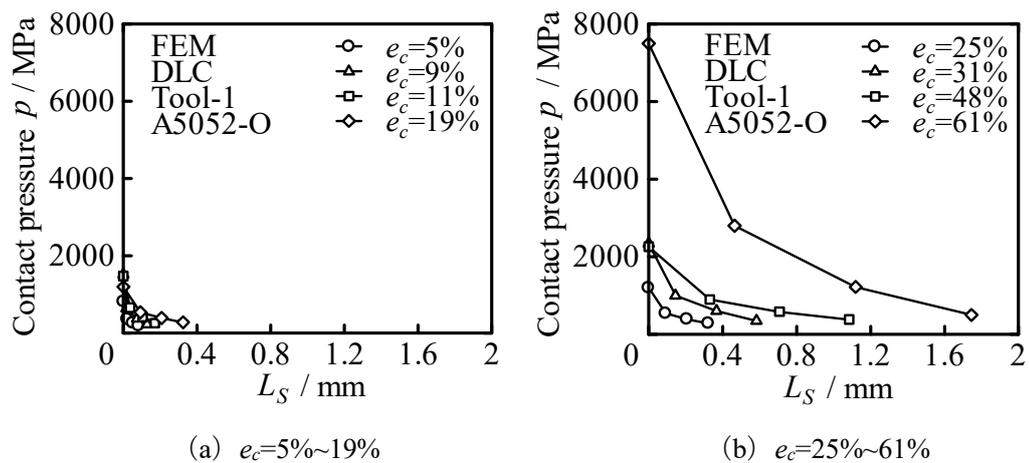


Fig.3.43 FEM 解析による変形の様子

($e_c=5\% : \mu=0.13$, $e_c=9\% : \mu=0.2$, $e_c=11\% : \mu=0.16$, $e_c=19\% : \mu=0.1$, $e_c=25\% : \mu=0.08$,
 $e_c=31\% : \mu=0.13$, $e_c=47\% : \mu=0.07$, $e_c=61\% : \mu=0.09$)

Fig.3.44 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O)

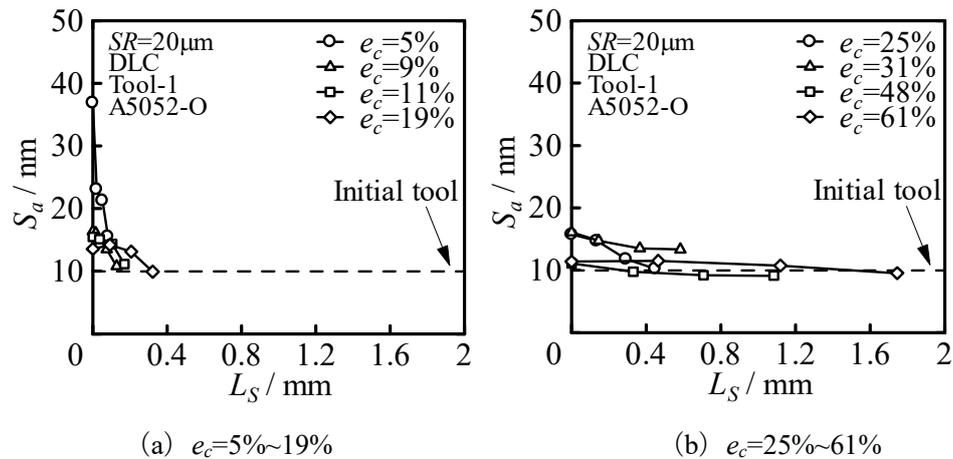


Fig.3.45 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O)

3.4 DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$), A5052-O における実験結果

3.4.1 圧縮率と表面粗さの関係

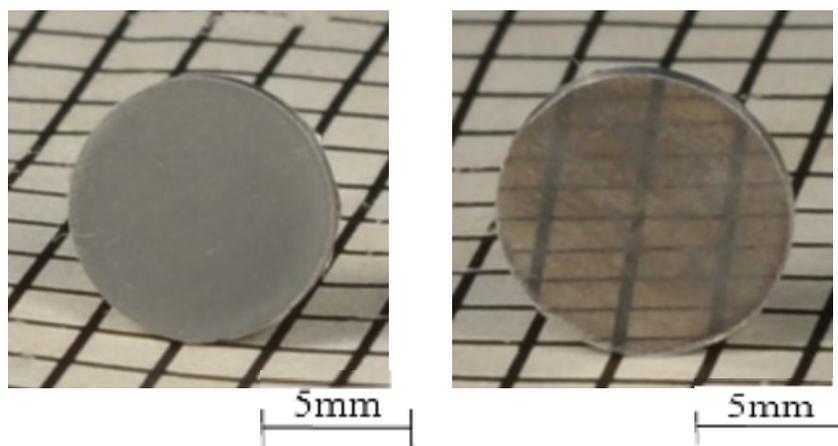
Fig.3.46 に圧縮前と平滑化が進んでいる圧縮率 $e_c=15\%$ の試験片の外観を示す。圧縮加工により試験片表面が鏡面化された様子がわかる。

Fig.3.47 に圧縮後工具表面写真の例を示す。圧縮による工具表面への影響はほとんど見られなかった。

Fig.3.48 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 20% までに平滑化が進み、 $R_a=10\text{nm}$ 程度まで平滑化され、それ以降において平滑化は進まない。

Fig.3.49 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率が大きくなると平均面圧も大きくなる傾向が見られる。

Fig.3.50 に荷重 P とレコーダー出力変位 S_r の関係を示す。それぞれの実験において大きな違いは見られない。



(a) 圧縮前試験片 (b) 圧縮後試験片 ($e_c=15\%$)

Fig.3.46 圧縮前後の試験片の外観 (DLC, Tool-2, A5052-O)



Fig.3.47 圧縮後工具表面 (DLC, Tool-2, A5052-O, $e_c=15\%$)

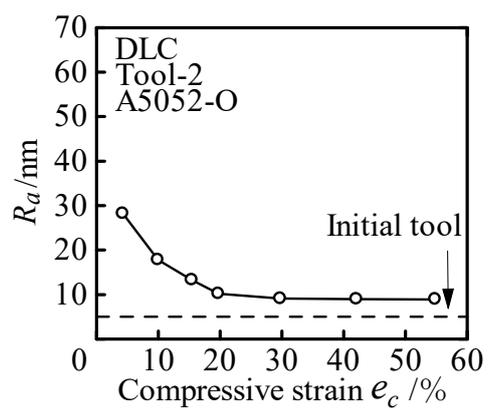


Fig.3.48 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A5052-O)

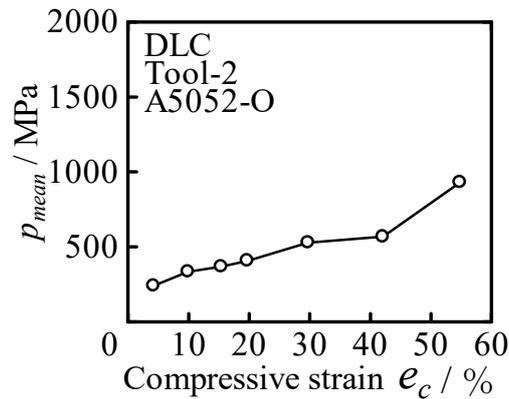


Fig.3.49 平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A5052-O)

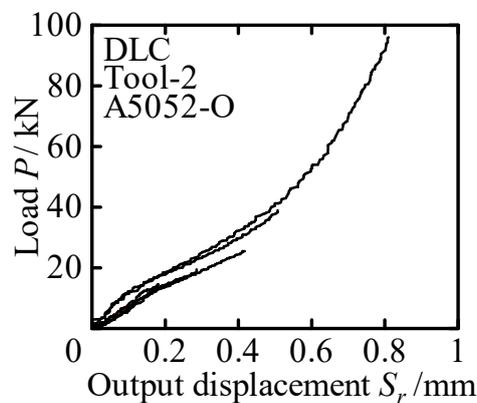


Fig.3.50 荷重 P とレコーダー出力変位 S_r の関係 (DLC, Tool-2, A5052-O)

3.4.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

AFM を用いて試験片の局所的な観察を行った。Fig.3.51 に試験片初期表面の AFM 像を、Fig.3.52 に $e_c=30\%$ に圧縮した試験片の AFM 像を示す。画像より、中心部より外周部のほうが r 方向に材料流動していることがわかる。

Fig.3.53 に AFM により得られた算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率が大きくなるにつれて S_a が小さくなり、圧縮率 10% 以上では大きな差は見られない。中心部よりも外周部の方が S_a が小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.54 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よりも外周部の方が S_a が小さくなる傾向が見られるが、高圧縮率では大きな差は見られない。

Fig.3.55 に測定箇所 $r=1\text{mm}$ 、Fig.3.56 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。 $r=3\text{mm}$ の $e_c=4\%$ でのみ、 r 方向の方が R_{ae} が小さくなっている。これは、 r 方向では材料流動によるしごき効果により θ 方向に比べて平滑化が進んでいるためであると考えられる。

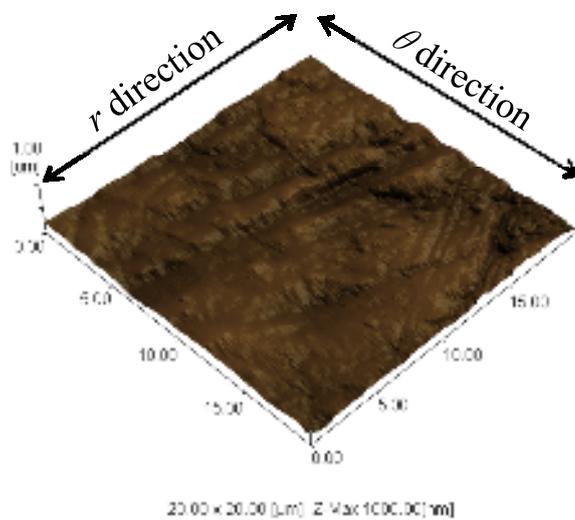
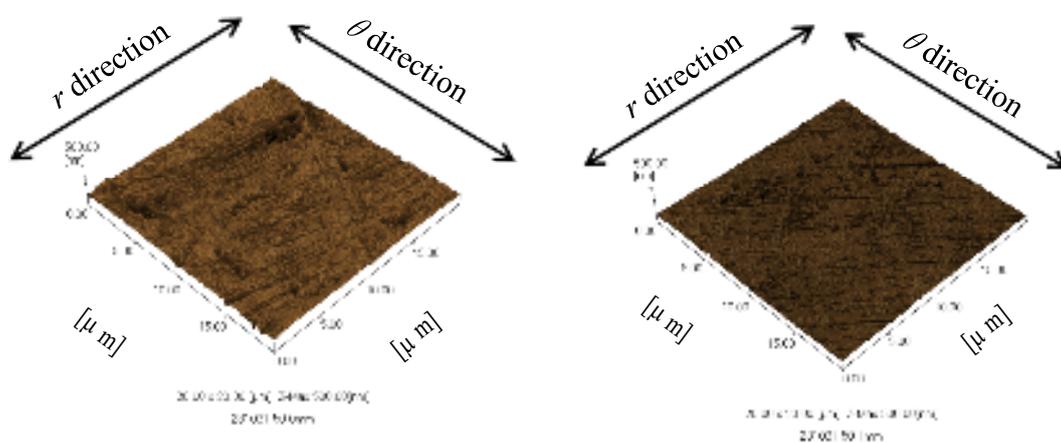


Fig.3.51 初期試験片表面の AFM 像の例 ($SR=20\mu\text{m}$, $e_c=0\%$)



(a) 測定箇所 $r=0\text{mm}$

(b) 測定箇所 $r=1\text{mm}$

Fig.3.52 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像
(DLC, Tool-2, A5052-O, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=30\%$)

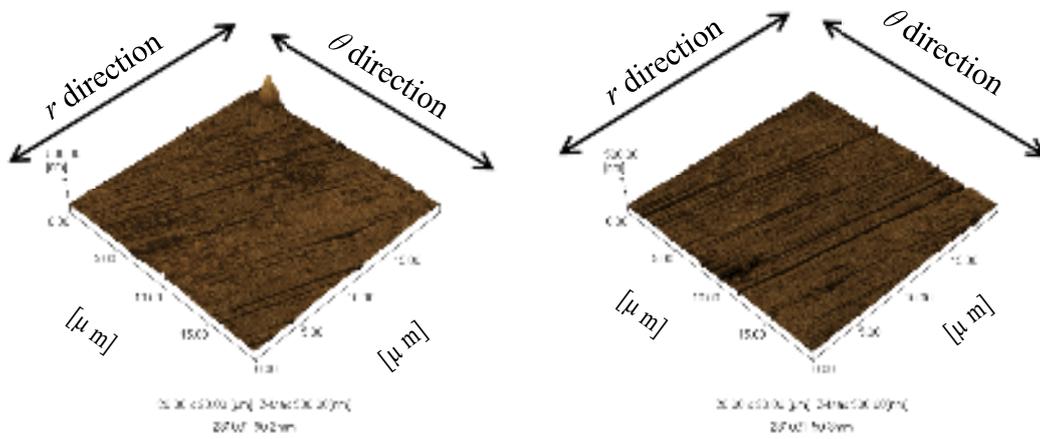
(c) 測定箇所 $r=2\text{mm}$ (d) 測定箇所 $r=3\text{mm}$

Fig.3.52 圧縮試験後の試験片表面の AFM 像
(DLC, Tool-2, A5052-O, $SR=20\mu\text{m}$, $e_c=30\%$)

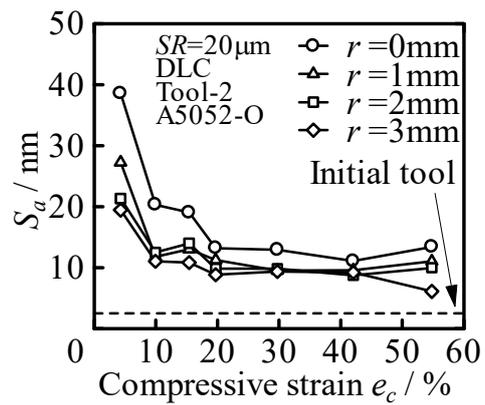


Fig.3.53 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A5052-O)

Fig.3.56 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の關係 (DLC, Tool-2, A5052-O, $r=3\text{mm}$)

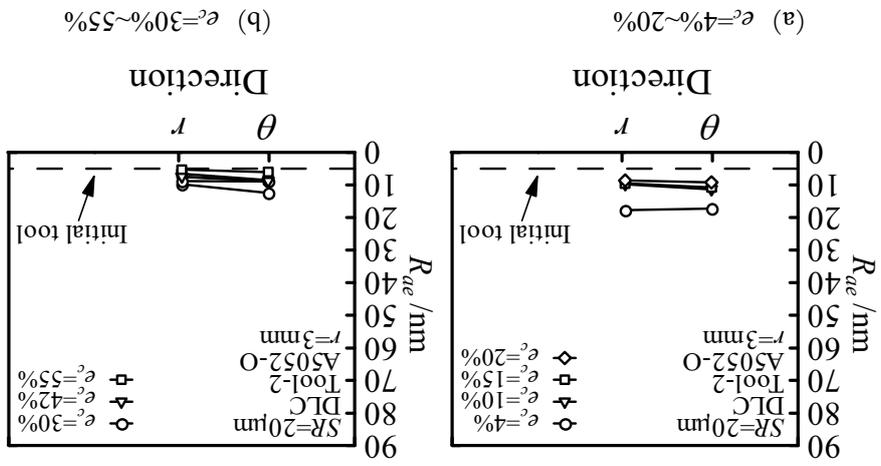


Fig.3.55 算術平均粗さ相当値 R_{ae} と測定方向の關係 (DLC, Tool-2, A5052-O, $r=1\text{mm}$)

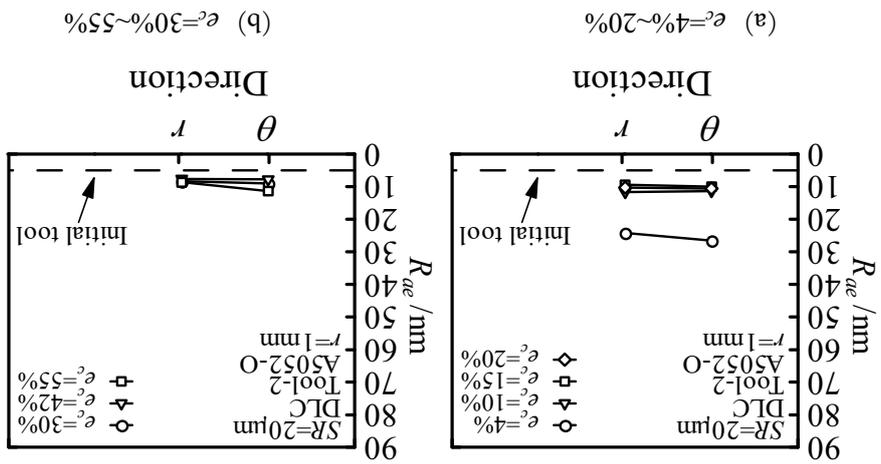
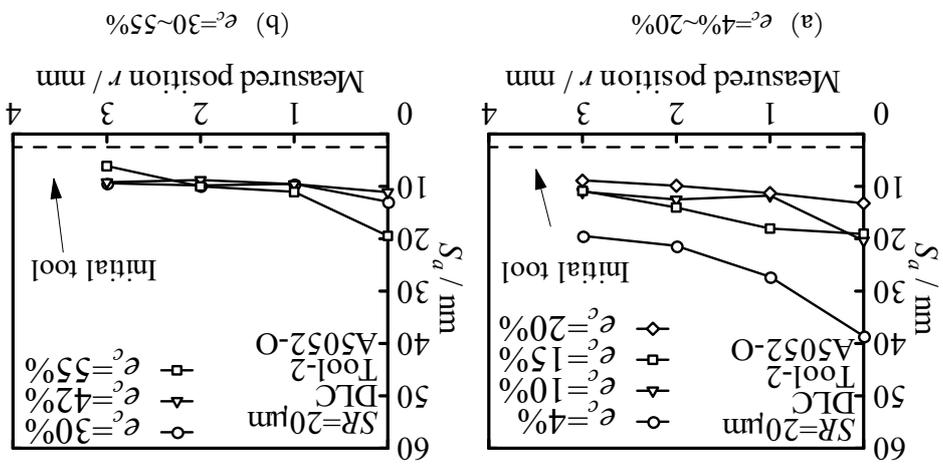


Fig.3.54 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の關係 (DLC, Tool-2, A5052-O)



3.4.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

3.1.3 と同様に FEM 解析を行った。Fig.3.57 に FEM における荷重 P と圧縮率 e_c の関係の例を示す。加工初期を除き実験結果と FEM 結果はおおむね一致している。

Fig.3.58 に FEM 解析による変形の様子を示す。なお、圧縮率 $e_c=4\%$ については FEM において本ソフトウェアで設定できる最大摩擦係数 $\mu=0.577$ にして計算した最終荷重よりも、実験値が大きくなったため、それ以外の結果のみ考察を行う。中心部の相対すべり量は小さく、外周部ほど相対すべり量が大きくなる傾向がある。また、各実験における最終荷重と一致するように決定した摩擦係数 μ は 0.1~0.15 となっている。各実験での潤滑条件は違いがあると考えられる。

Fig.3.59 に FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。圧縮率が大きくなると面圧、すべり量ともに大きくなるのがわかる。

Fig.3.60 に算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。低圧縮率ではすべり量が大きくなると S_a が小さくなる傾向がみられる。高圧縮率ではすべり量による大きな違いは見られない。

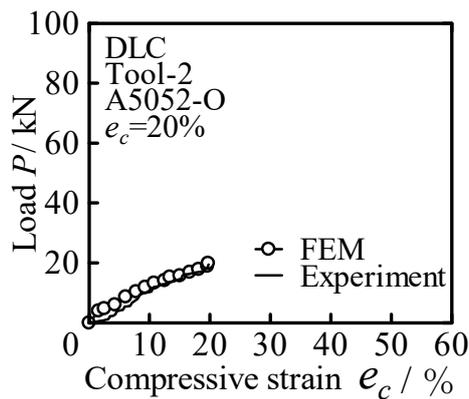


Fig.3.57 荷重 P と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A5052-O, $e_c=20\%$)

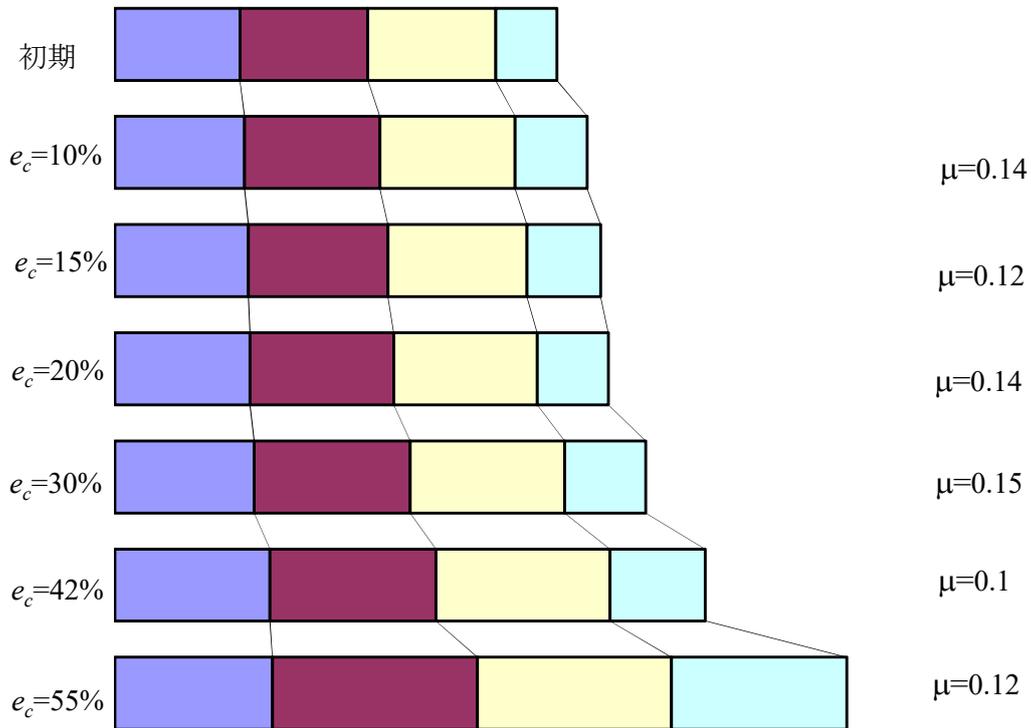
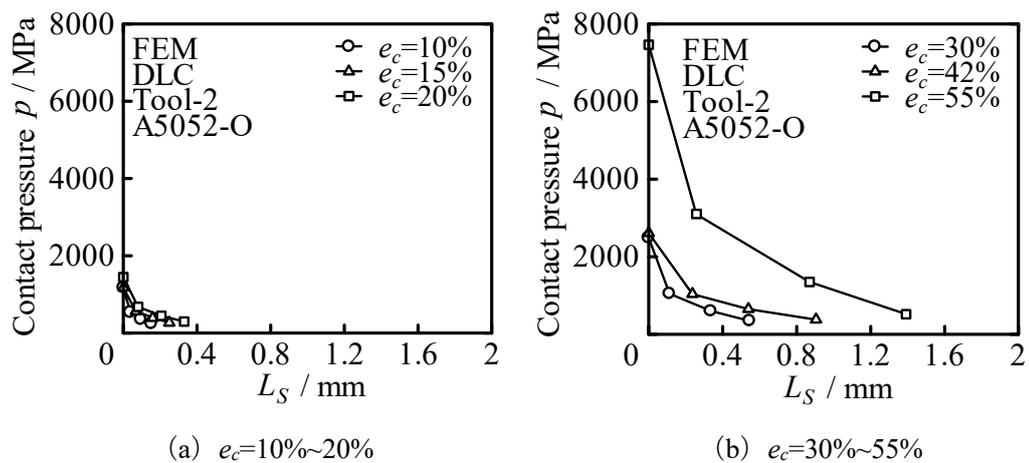


Fig.3.58 FEM 解析による変形の様子

($e_c=10\% : \mu=0.14$, $e_c=15\% : \mu=0.12$, $e_c=20\% : \mu=0.14$, $e_c=30\% : \mu=0.15$, $e_c=42\% : \mu=0.1$,
 $e_c=55\% : \mu=0.12$)

Fig.3.59 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-2, A5052-O)

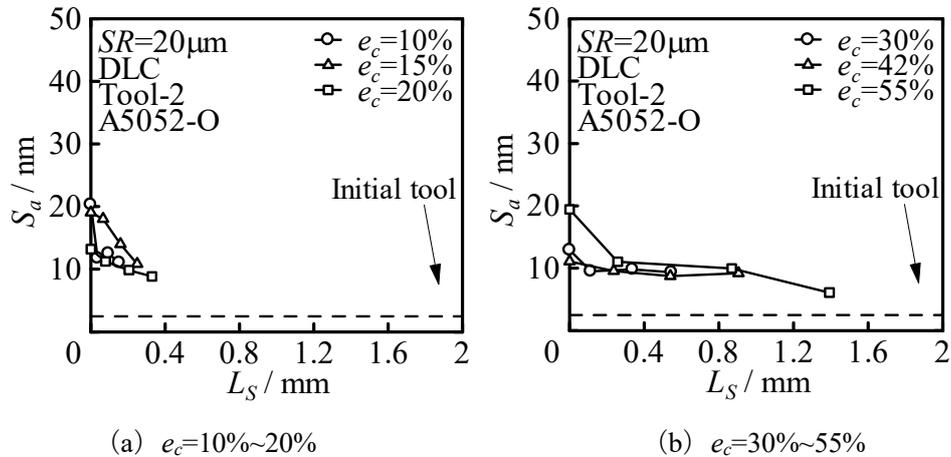


Fig.3.60 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-2, A5052-O)

3.5 工具表面粗さの影響

工具表面粗さの影響を調べるため、今回行った A5052-H と A5052-O における DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) の圧縮試験結果と DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) の圧縮試験結果の比較を行う。

3.5.1 A5052-H の結果

3.5.1.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.61 に各条件の触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。ほとんどの圧縮率において Tool-2 の方が R_a が小さいことがわかる。特に低圧縮率では R_a の差は大きいですが、圧縮率が大きくなるにつれてその差が小さくなることがわかる。また、Tool-1 では初期工具と同程度の平滑度が得られるのに対し、Tool-2 では初期工具ほどの平滑度が得られないことがわかる。

Fig.3.62 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。低圧縮率において表面粗さによる大きな差は見られないが、高圧縮率においては表面粗さが大きい Tool-1 の方が平均面圧が高くなる傾向が見られる。

Fig.3.63 に FEM 解析より求めた摩擦係数 μ と圧縮率 e_c の関係を示す。これより、高圧縮率では表面粗さが大きい Tool-1 の方が工具と試験片の間の摩擦が大きくなり、必要な荷重が大きくなったと考えられる。

Fig.3.64 に荷重 P と変位 S_r の関係を示す。いずれの条件においても表面粗さが大きい Tool-1 の方が荷重が大きくなっている。これは表面粗さが大きいほど工具と試験片の間の摩擦が大きくなったためと考えられる。

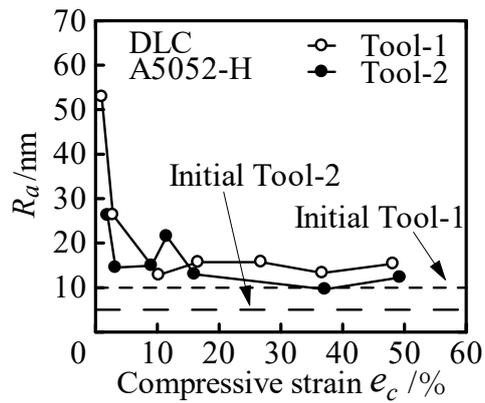


Fig.3.61 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係(DLC, A5052-H)

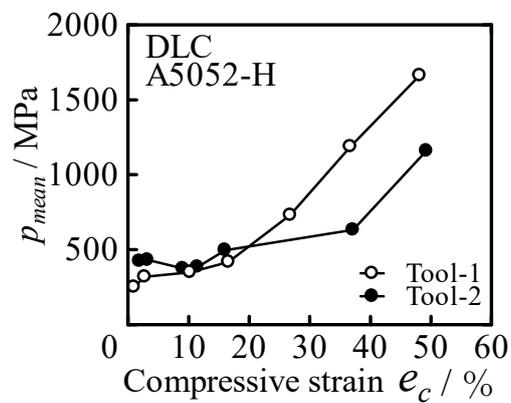


Fig.3.62 平均面圧 P_{mean} と圧縮率 e_c の関係(DLC, A5052-H)

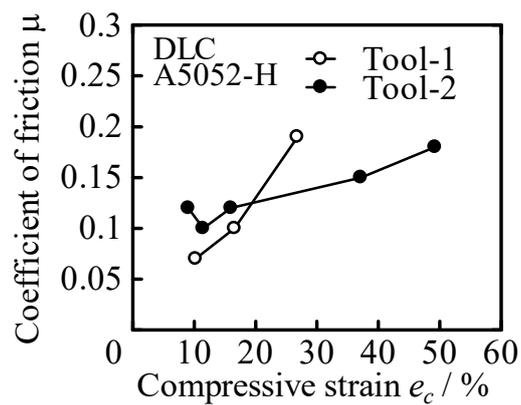


Fig.3.63 摩擦係数 μ と圧縮率 e_c の関係(DLC, A5052-H)

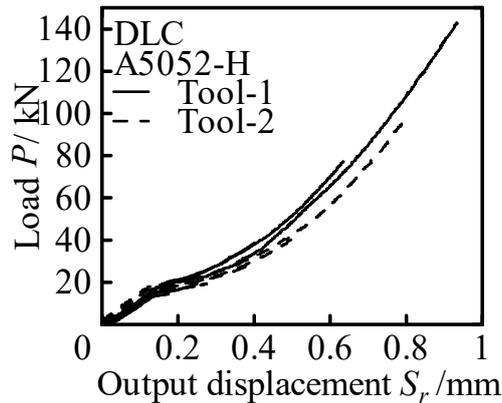


Fig.3.64 荷重 P と変位 S_r の関係(DLC, A5052-H)

3.5.1.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

Fig.3.65 に A5052-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。中心部では圧縮率 20%付近から Tool-2 の方が S_a が小さくなっている。外周部では低圧縮率で Tool-1 の方が S_a が小さくなっているが、圧縮率 20%付近からはほとんど差が見られない。また、Tool-1 では高圧縮率において初期工具表面粗さ程度の平滑度が得られるが、Tool-2 では初期工具表面粗さまで平滑化が進まない。

Fig.3.66 に A5052-H の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。Tool-1, Tool-2 とともに圧縮率が大きくなるにつれて S_a が小さくなっている。また、Tool-1 では高圧縮率において初期工具表面粗さ程度の平滑度が得られるが、Tool-2 では初期工具表面粗さまで平滑化が進まない。

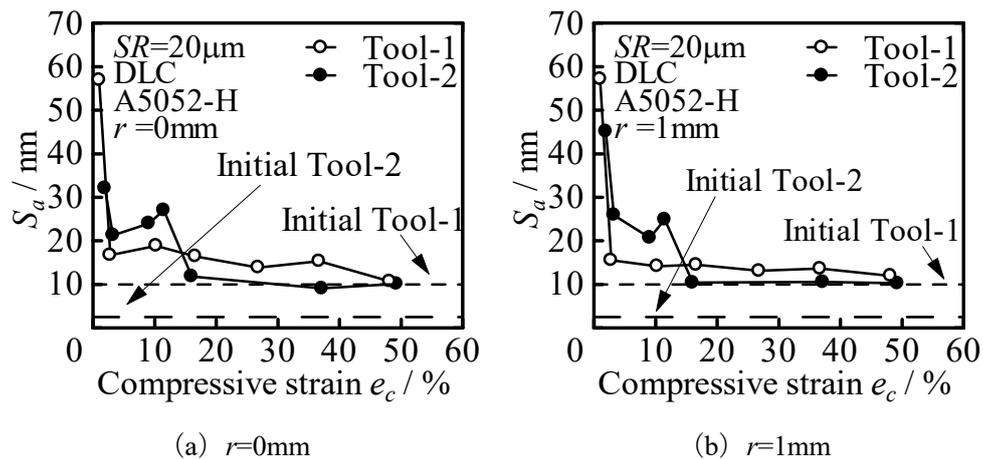


Fig.3.65 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, A5052-H)

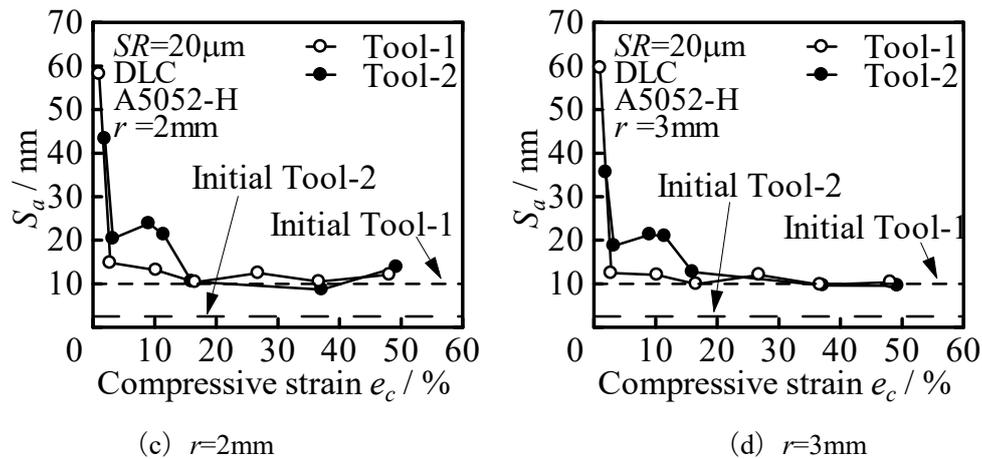


Fig.3.65 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, A5052-H)

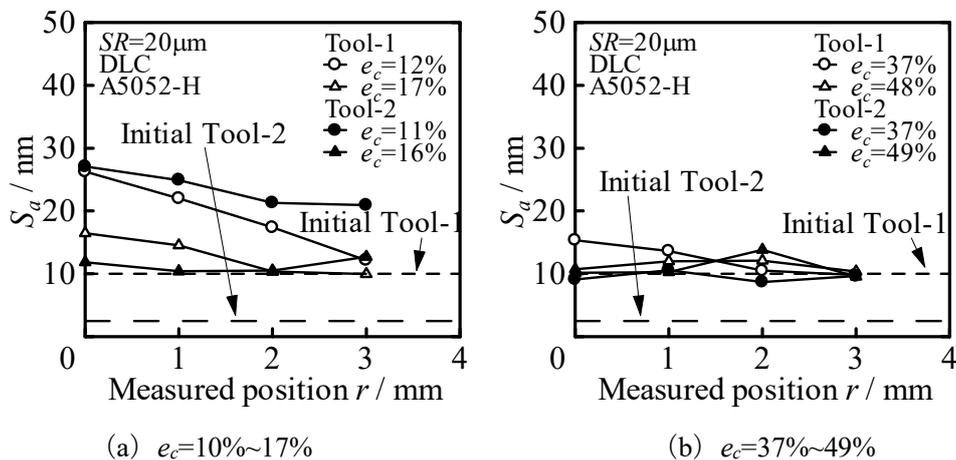


Fig.3.66 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, A5052-H)

3.5.1.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

Fig.3.67 に A5052-H の FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。低圧縮率ではすべり量が小さいとき、表面粗さの大きい Tool-1 の方が面圧が小さくなる。

Fig.3.68 に A5052-H の算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。Tool-1 ではすべり量が大きくなると算術平均面粗さは小さくなるが、Tool-2 ではすべり量による算術平均面粗さの大きな違いは見られない。Tool-1 では初期工具表面粗さ程度の平滑化が得られるが、Tool-2 では初期工具表面粗さまで平滑化が進まない。

以上より、A5052-H では、高圧縮率では表面粗さが小さい Tool-2 の方が平滑化が進む。外周部では中心部と比べその差は小さくなり、Tool-1 の外周部では初期工具表面粗さ程度まで平滑化が進むが Tool-2 では初期工具表面粗さまで平滑化が進まない。

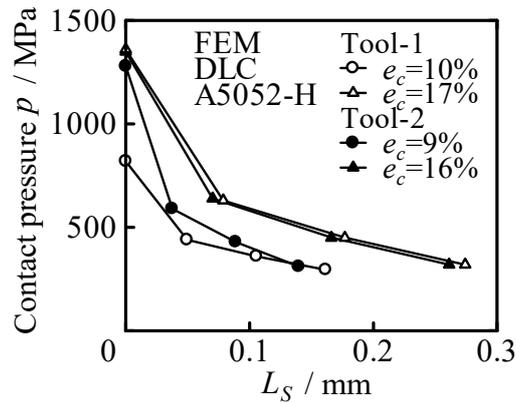


Fig.3.67 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, A5052-H)

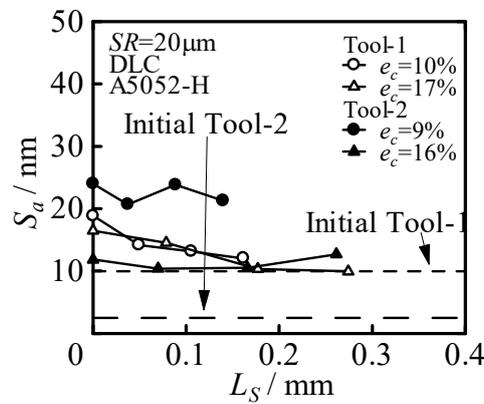


Fig.3.68 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, A5052-H)

3.5.2 A5052-O の結果

3.5.2.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.69 に各条件の触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。ほとんどの圧縮率において R_a に表面粗さによる違いはないことがわかる。また、Tool-1 では初期工具と同程度の平滑度が得られるのに対し、Tool-2 では初期工具ほどの平滑度が得られないことがわかる。

Fig.3.70 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。表面粗さによる大きな差は見られない。

Fig.3.71 に FEM 解析より求めた摩擦係数 μ と圧縮率 e_c の関係を示す。同程度の圧縮率では摩擦係数は表面粗さによらず、近い値になっていることがわかる。

Fig.3.72 に荷重 P と変位 S_r の関係を示す。いずれの条件においても表面粗さによる違いはほとんど見られない。

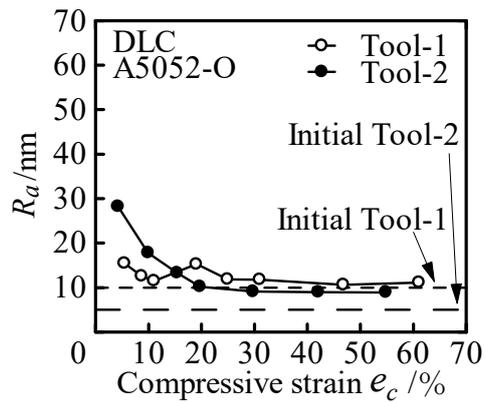


Fig.3.69 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係(DLC, A5052-O)

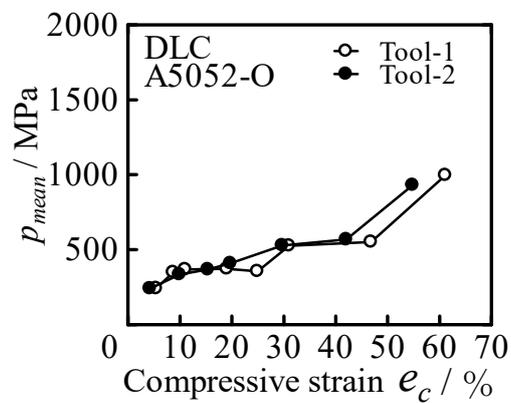


Fig.3.70 平均面圧 P_{mean} と圧縮率 e_c の関係(DLC, A5052-O)

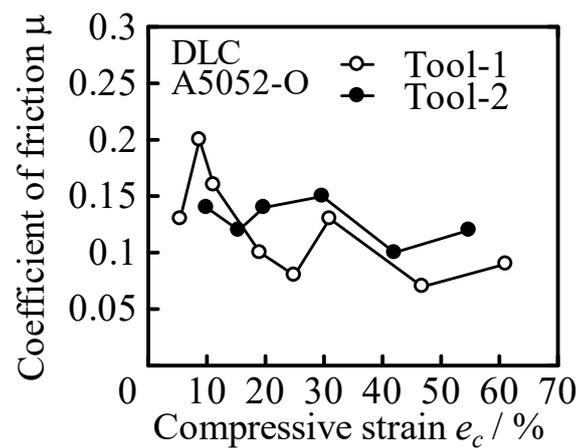


Fig.3.71 摩擦係数 μ と圧縮率 e_c の関係(DLC, A5052-O)

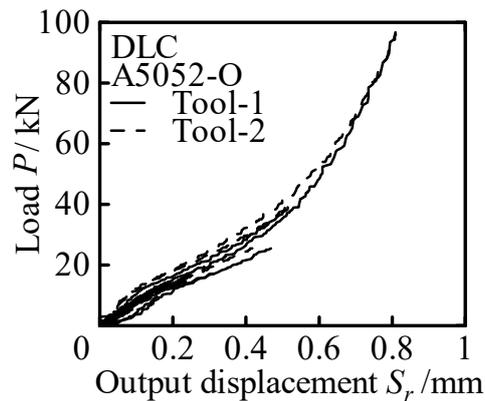


Fig.3.72 荷重 P と変位 S_r の関係(DLC, A5052-O)

3.5.2.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

Fig.3.73 に A5052-O の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの測定箇所においても平滑度に大きな違いはない. また, Tool-1 では高圧縮率において初期工具表面粗さ程度の平滑度が得られるが, Tool-2 では初期工具表面粗さまで平滑化が進まない.

Fig.3.74 に A5052-O の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. Tool-1, Tool-2 とともに測定箇所による平滑度の差が小さいことがわかる.

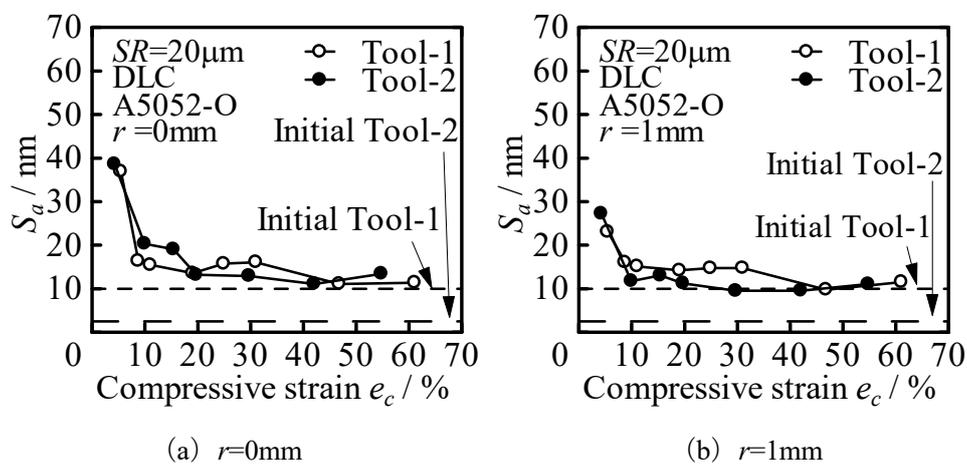


Fig.3.73 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, A5052-O)

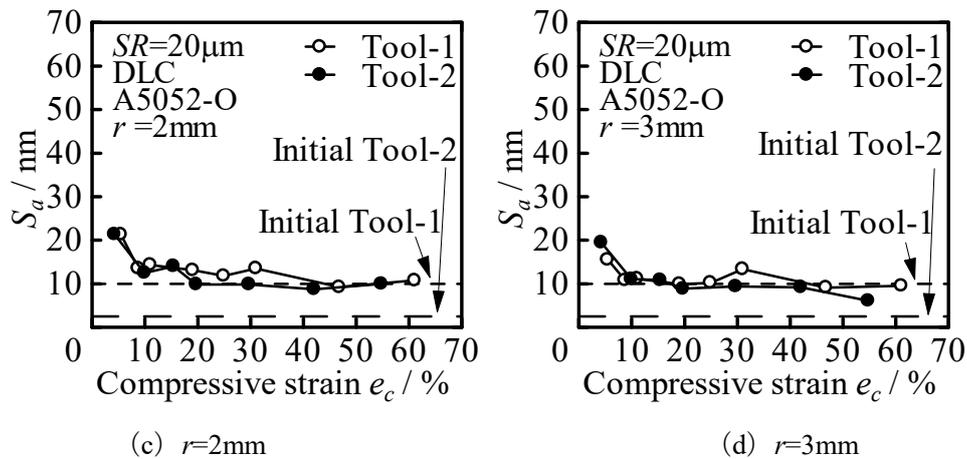


Fig.3.73 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, A5052-O)

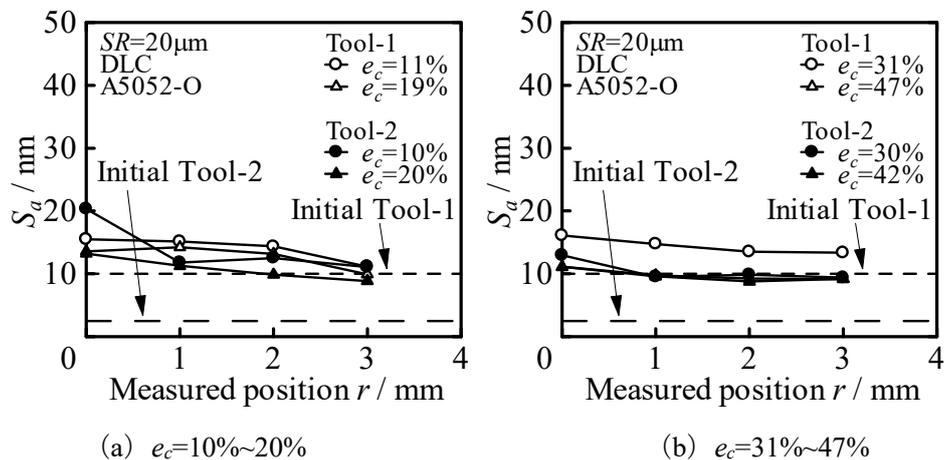


Fig.3.74 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, A5052-O)

3.5.2.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

Fig.3.75 に A5052-O の FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係を示す。圧縮率が近いとき、Tool-1 と Tool-2 の面圧、すべり量ともにほとんど差は見られない。

Fig.3.76 に A5052-O の算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係を示す。Tool-2 の方がすべり量による平滑度への影響が大きいことがわかる。Tool-1 では初期工具表面粗さ程度の平滑度が得られるが、Tool-2 では初期工具表面粗さまで平滑化が進まない。

以上より、A5052-O では、いずれの測定箇所においても表面粗さによる平滑度への影響にほとんど差は見られなかった。外周部では中心部と比べその差は小さくなり、Tool-1 の外周部では初期工具表面粗さ程度まで平滑化が進むが Tool-2 では初期工具表面粗さまで平滑化が進まない。

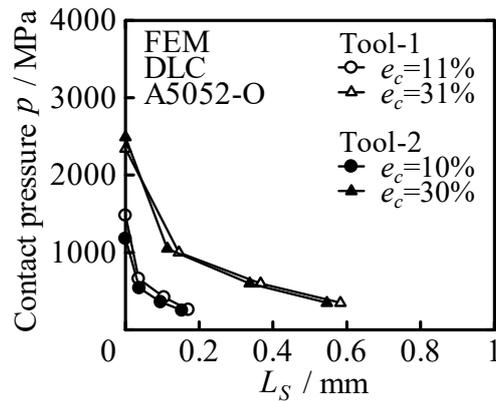


Fig.3.75 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, A5052-O)

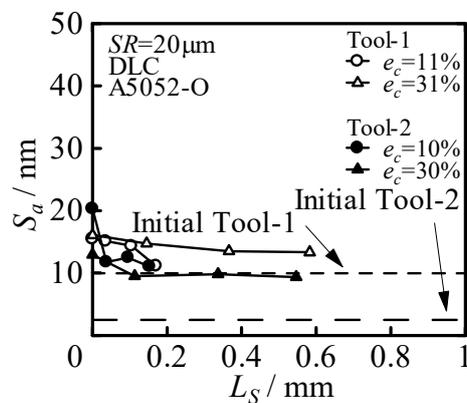


Fig.3.76 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, A5052-O)

3.6 加工硬化の影響

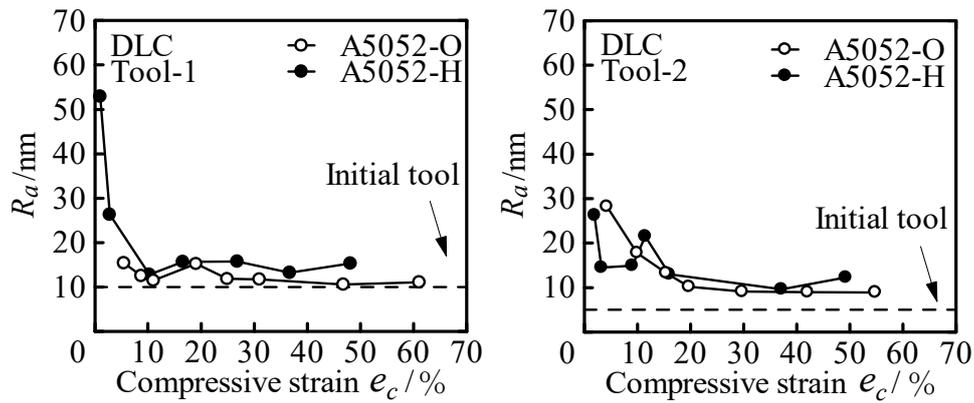
加工硬化の影響を調べるため、今回行った DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) と DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における A5052-H の圧縮試験結果と A5052-O の圧縮試験結果の比較を行う。

3.6.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.77 に各条件における触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの圧縮率においても A5052-H の方が R_a が小さくなる傾向が見られる。

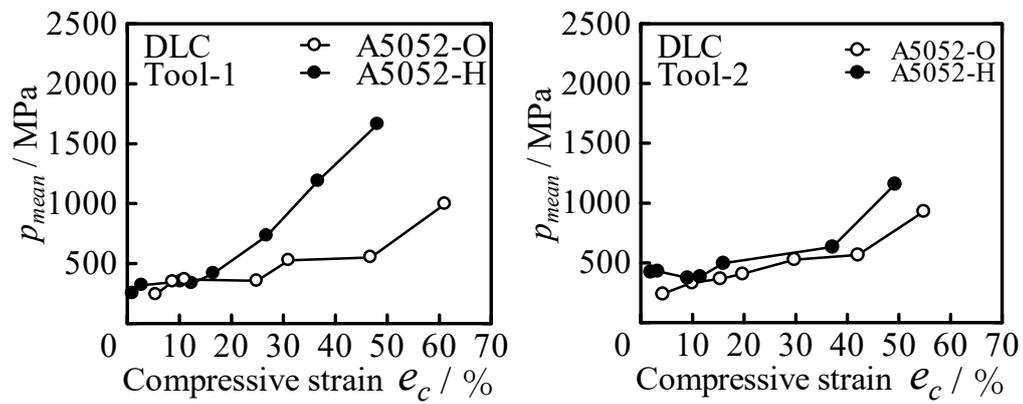
Fig.3.78 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの圧縮率においても A5052-H の方が平均面圧が大きくなっている。

Fig.3.79 に荷重 P と変位 S_r の関係を示す。Tool-1 の条件では A5052-H の方が荷重は大きくなることがわかる。Tool-2 の条件では S_r が大きくなるにつれて A5052-O と A5052-H の間に荷重 P の差が見られなくなる。



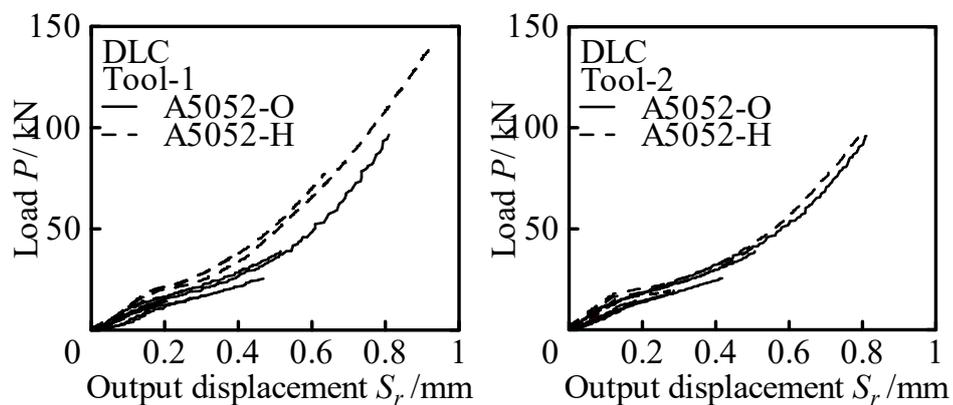
(a) DLC, Tool-1

(b) DLC, Tool-2

Fig.3.77 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係

(a) DLC, Tool-1

(b) DLC, Tool-2

Fig.3.78 平均面圧 P_{mean} と圧縮率 e_c の関係

(a) DLC, Tool-1

(b) DLC, Tool-2

Fig.3.79 荷重 P と変位 S_r の関係

3.6.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

Fig.3.80 に Tool-1 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。低圧縮率において A5052-H の方が S_a が小さくなっている。これは変形抵抗の大きい A5052-H の方が面圧による転写効果の影響が大きいからだと考えられる。高圧縮率では測定箇所によらず大きな差は見られない。

Fig.3.81 に Tool-2 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。測定箇所によらず大きな違いは見られない。

Fig.3.82 に Tool-1 の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。A5052-O と A5052-H のどちらも外周部で S_a が小さくなる傾向が見られる。A5052-O と A5052-H の間に大きな違いは見られない。

Fig.3.83 に Tool-2 の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。A5052-O と A5052-H の間に大きな差は見られない。

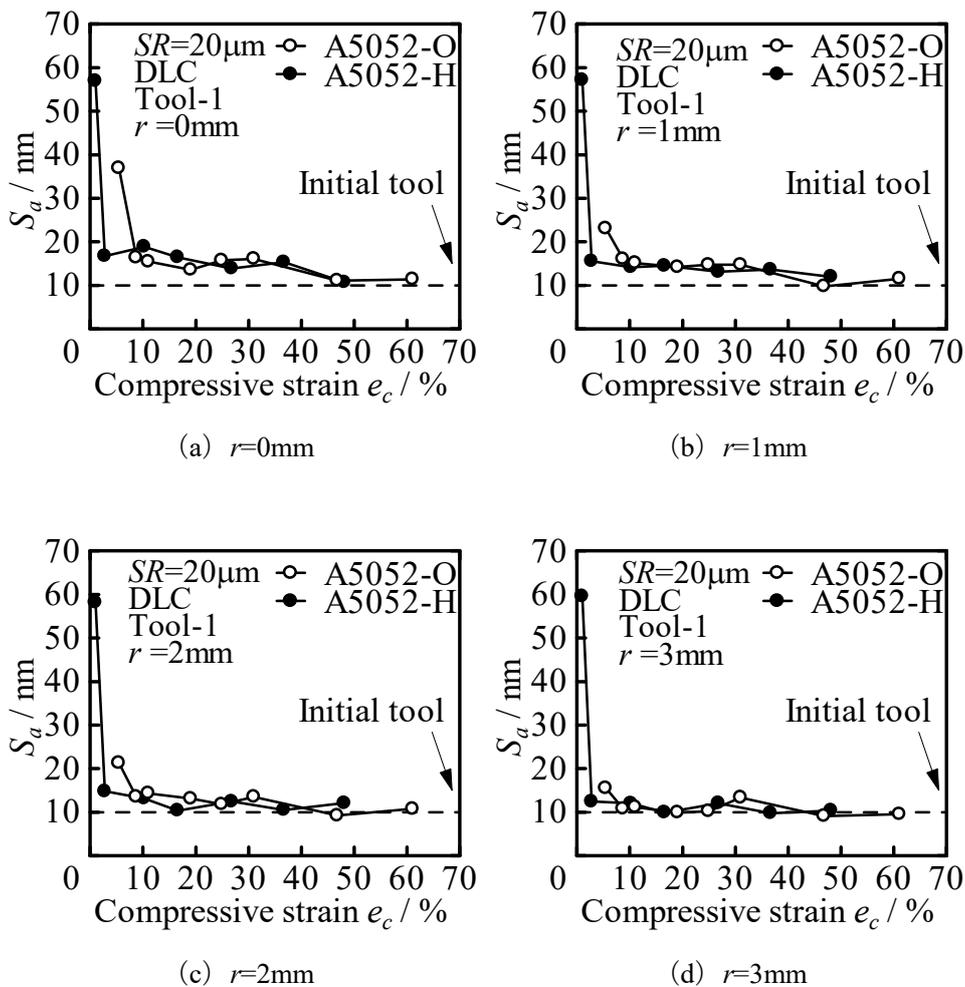
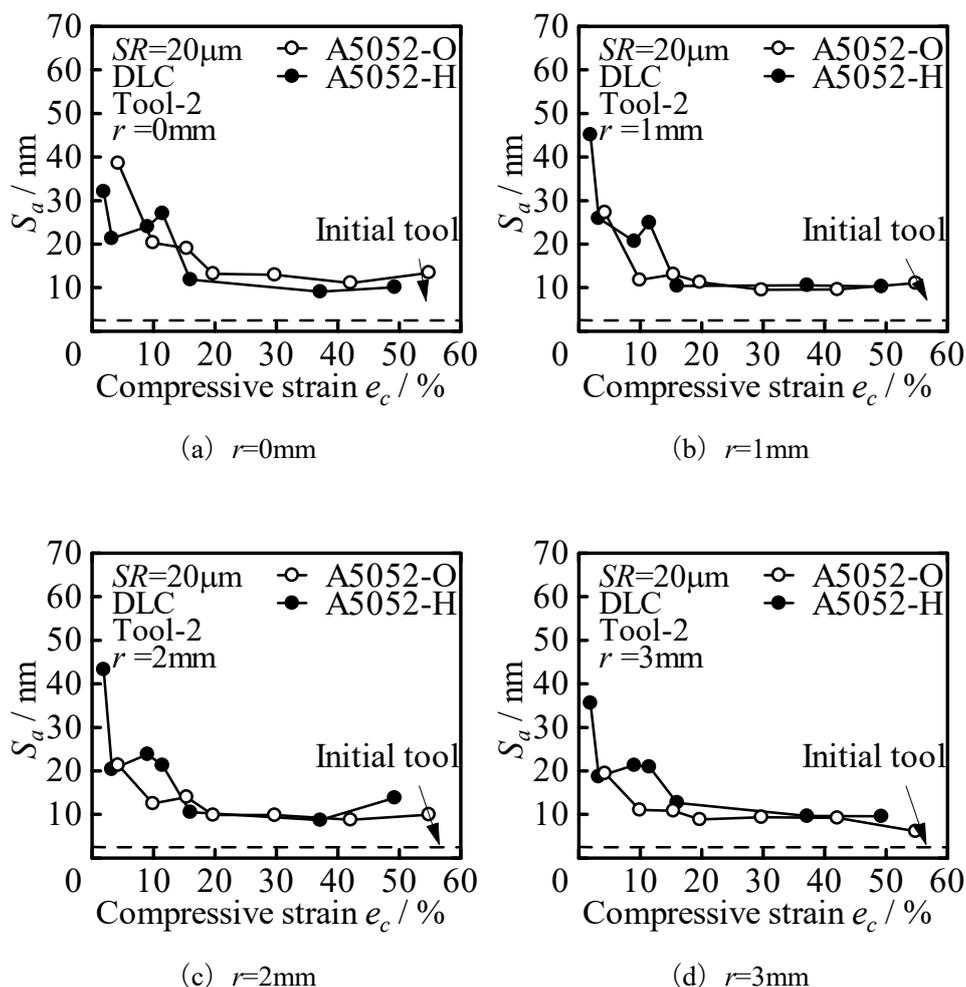
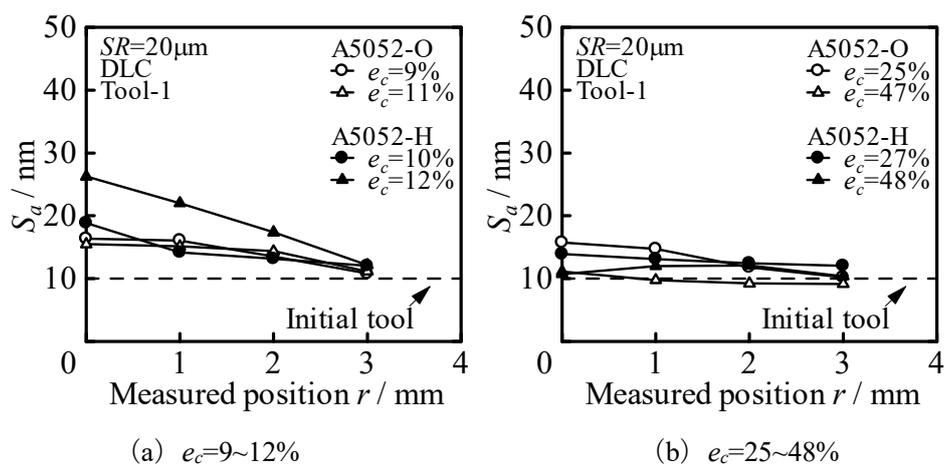


Fig.3.80 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1)

Fig.3.81 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2)Fig.3.82 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-1, O材)

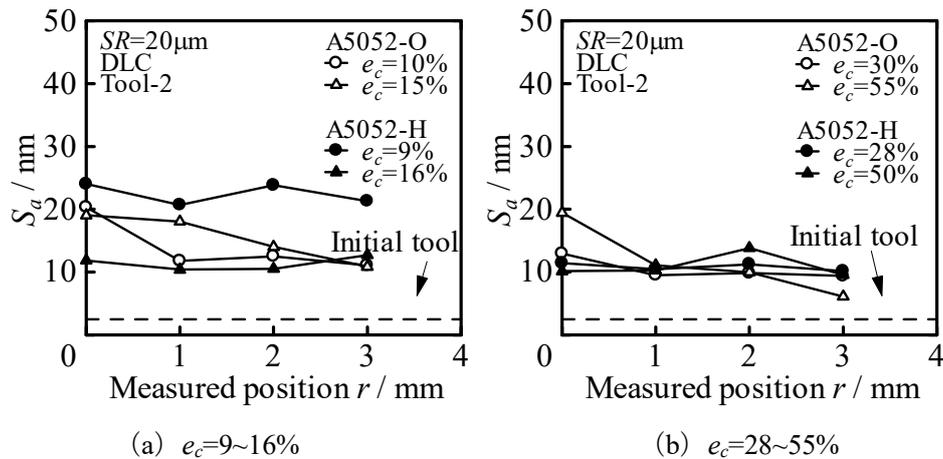


Fig.3.83 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-2)

3.6.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

Fig.3.84 に Tool-1 での FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係を示す同程度の圧縮率では A5052-H の方が面圧が大きくなっていることがわかる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

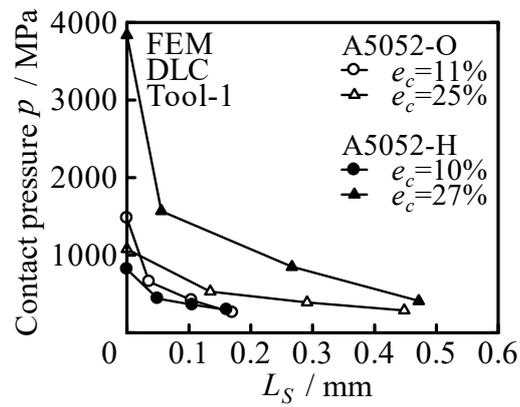
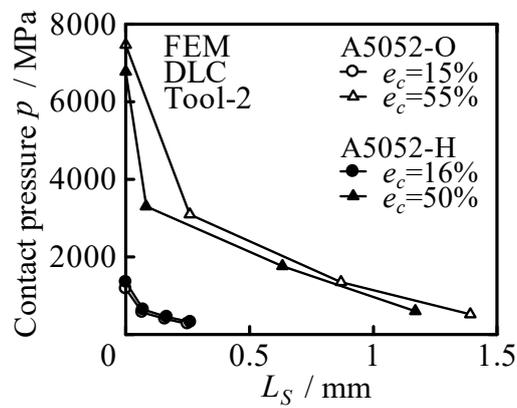
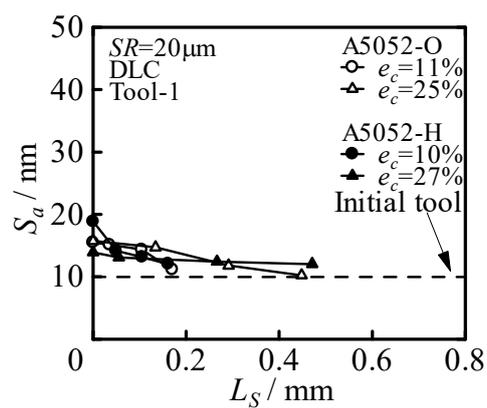
Fig.3.85 に Tool-2 での FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_s の関係を示す。高圧縮率では A5052-H の方が面圧が大きくなっていることがわかる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.86 に Tool-1 での算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係を示す。いずれの材料においてもすべり量による S_a の変化はあまり見られないことがわかる。

Fig.3.87 に Tool-2 での算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係を示す。いずれの材料においてもすべり量による S_a の変化はあまり見られないことがわかる。

以上より、Tool-1 の条件において、低圧縮率において A5052-H の方が平滑化が進む。また、高圧縮率では測定箇所によらず大きな差は見られなかった。これは加工初期の変形抵抗の大きい A5052-H の方が面圧による転写効果の影響が大きいからだと考えられる。

Tool-2 の条件において、加工硬化による大きな違いは見られなかった。

Fig.3.84 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-1)Fig.3.85 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-2)Fig.3.86 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-1)

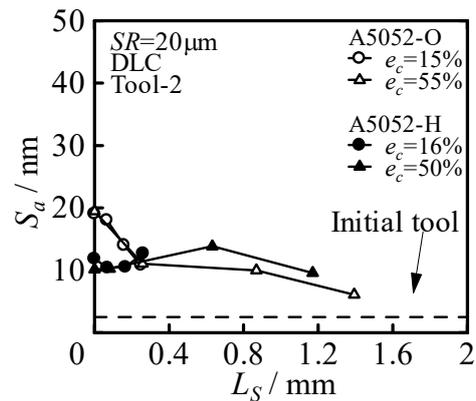


Fig.3.87 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係 (DLC, Tool-2)

3.7 材料の影響

3.7.1 A5052-H と A1050-H の比較

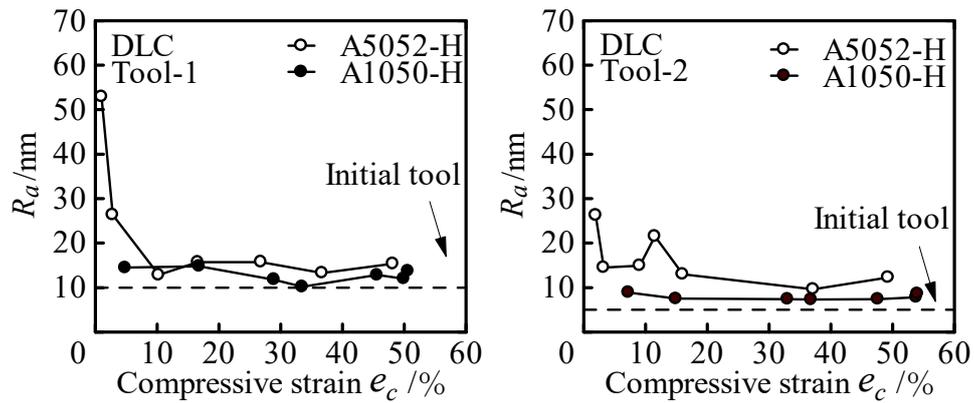
材料の違いによる平滑化の挙動を調べるため、DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った A5052-H の圧縮試験結果と過去に行った A1050-H の圧縮試験結果⁽¹⁸⁾の比較, DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った A5052-H の圧縮試験結果と過去に行った A1050-H の圧縮試験結果⁽¹⁸⁾の比較を行う。

3.7.1.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.88 に各条件における触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの圧縮率においても A1050-H の方が R_a が小さくなる傾向が見られる。

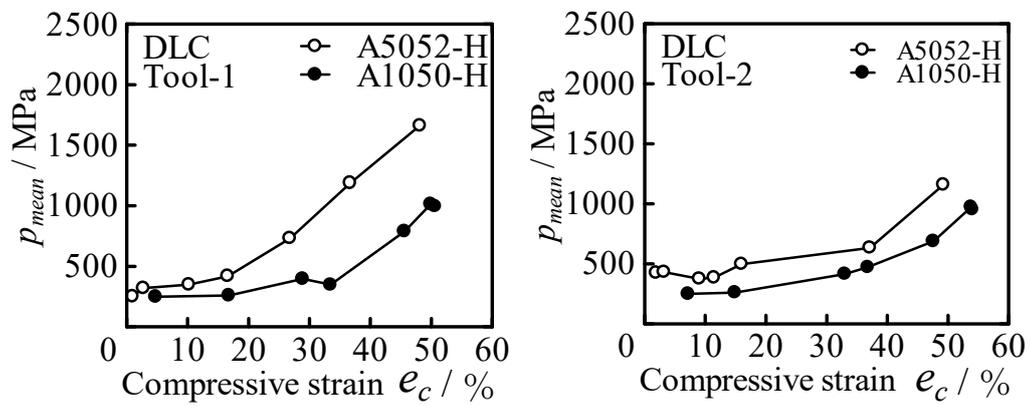
Fig.3.89 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの圧縮率においても A5052-H の方が平均面圧が大きくなっている。

Fig.3.90 に荷重 P と変位 S_r の関係を示す。DLC, Tool-1 の条件では A5052-H の方が荷重は大きくなることがわかる。DLC, Tool-2 の条件では S_r が大きくなるにつれて A5052-H と A1050-H の間に荷重 P の差が見られなくなる。



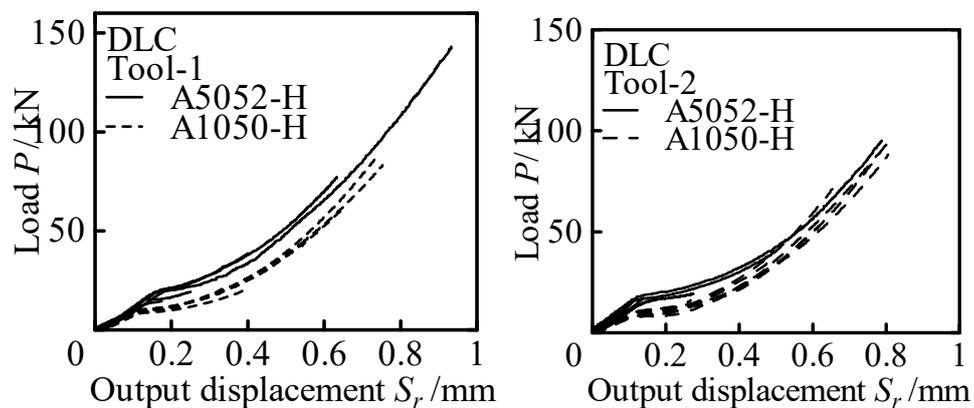
(a) DLC, Tool-1, H 材

(b) DLC, Tool-2, H 材

Fig.3.88 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係

(a) DLC, Tool-1, H 材

(b) DLC, Tool-2, H 材

Fig.3.89 平均面圧 P_{mean} と圧縮率 e_c の関係

(a) DLC, Tool-1, H 材

(b) DLC, Tool-2, H 材

Fig.3.90 荷重 P と変位 S_r の関係

3.7.1.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

Fig.3.91 に DLC, Tool-1 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 低圧縮率において中心部では大きな差は見られないが, 外周部では A5052-H の方が S_a が小さくなっている. これは変形抵抗の大きい A5052-H の方が面圧による転写効果の影響が大きいからだと考えられる. 高圧縮率では測定箇所によらず大きな差は見られない.

Fig.3.92 に DLC, Tool-2 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 測定箇所によらず大きな違いは見られない.

Fig.3.93 に DLC, Tool-1 の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. A5052-H と A1050-H のどちらも外周部で S_a が小さくなる傾向が見られる. A5052-H と A1050-H の間に大きな違いは見られない.

Fig.3.94 に DLC, Tool-2 の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. A5052-H と A1050-H の間に大きな差は見られない.

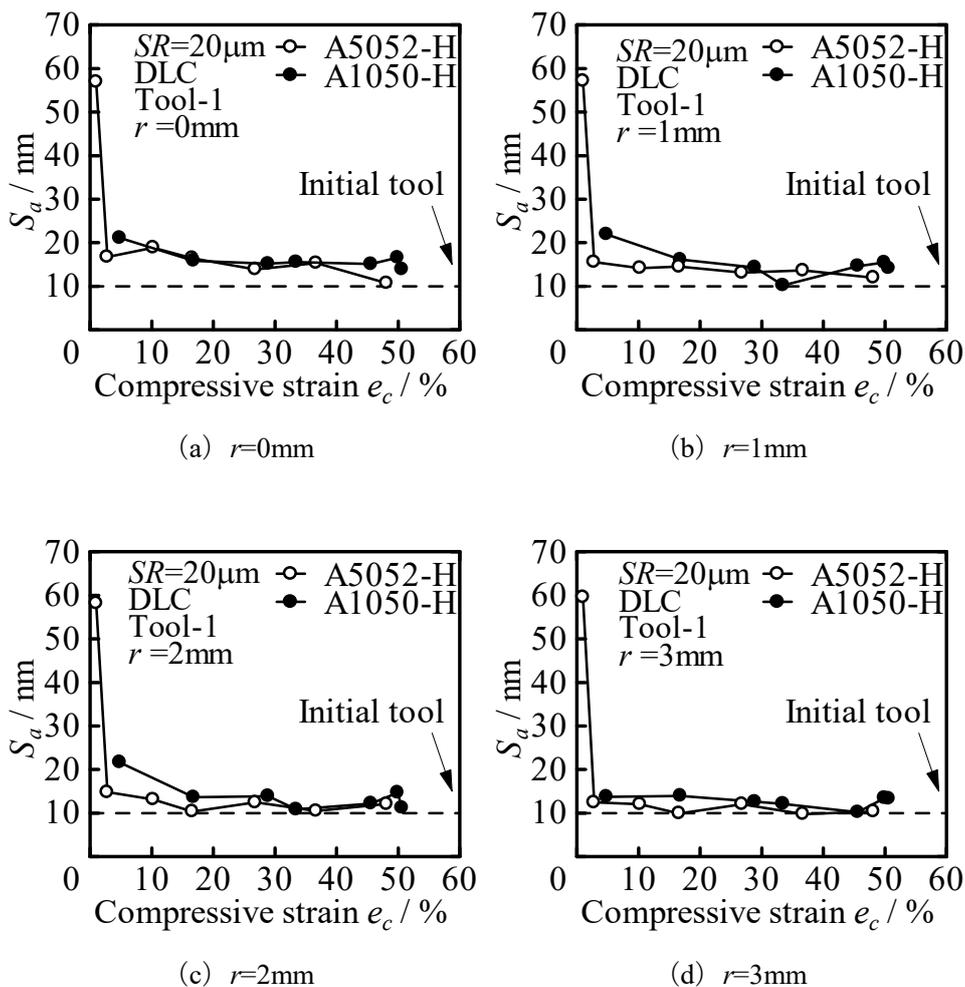


Fig.3.91 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, H材)

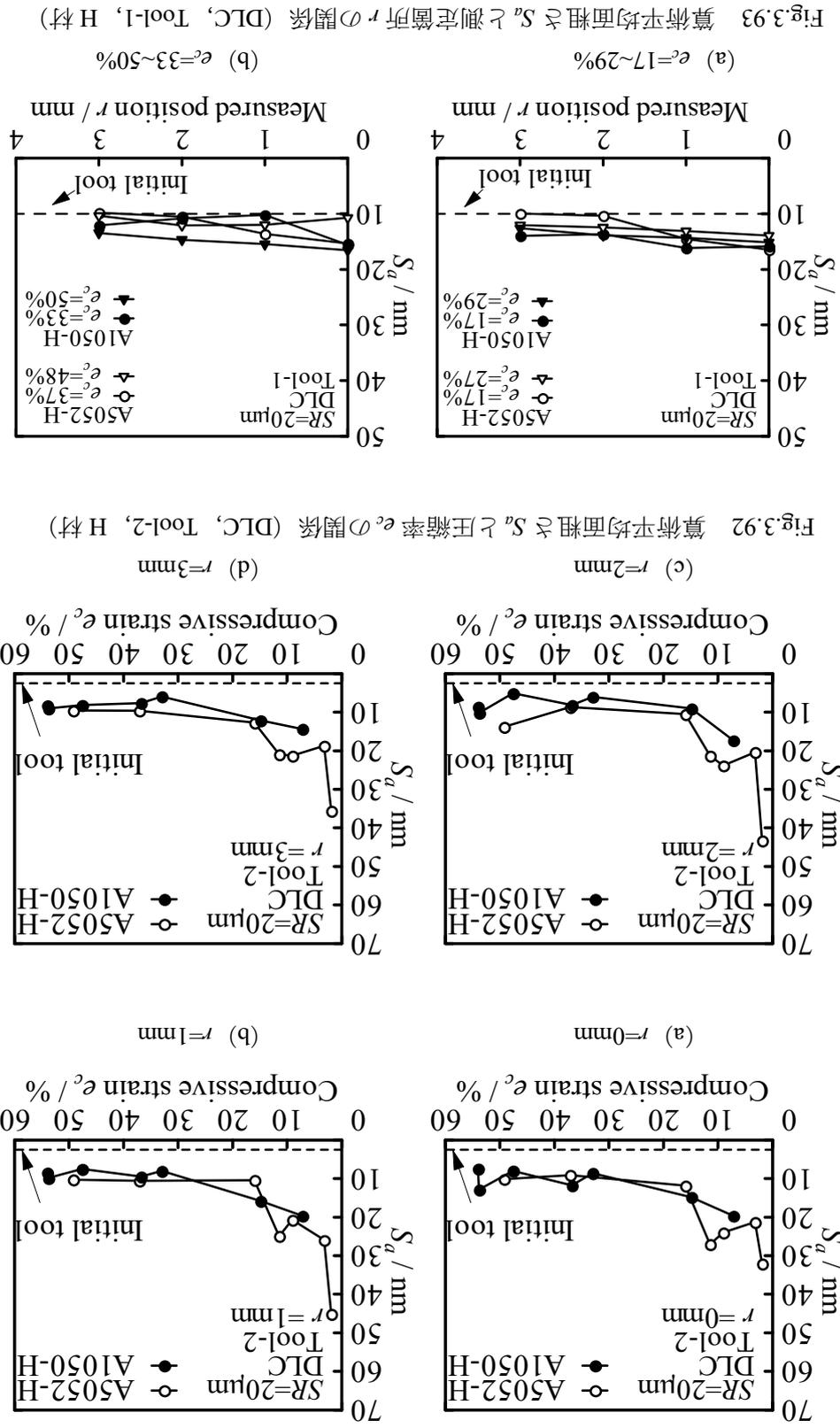


Fig.3.92 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, H材)

Fig.3.93 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-1, H材)

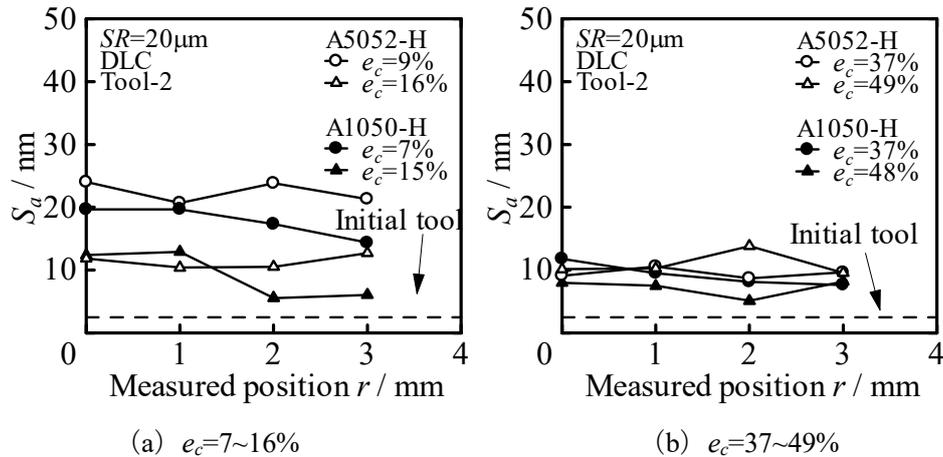


Fig.3.94 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-2, H 材)

3.7.1.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

Fig.3.95 に Tool-1 での FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す同程度の圧縮率では A5052-H の方が面圧が大きくなっていることがわかる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.96 に Tool-2 での FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。同程度の圧縮率では A5052-H の方が面圧が大きくなっていることがわかる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.97 に Tool-1 での算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。いずれの材料においてもすべり量による S_a の変化はあまり見られないことがわかる。

Fig.3.98 に Tool-2 での算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。いずれの材料においてもすべり量による S_a の変化はあまり見られないことがわかる。

以上より, Tool-1 の条件において, 低圧縮率において中心部では大きな差は見られないが, 外周部では A5052-H の方が平滑化が進む。また, 高圧縮率では測定箇所によらず大きな差は見られなかった。これは変形抵抗の大きい A5052-H の方が面圧による転写効果の影響が大きいからだと考えられる。

Tool-2 の条件において, 材料による大きな違いは見られなかった。

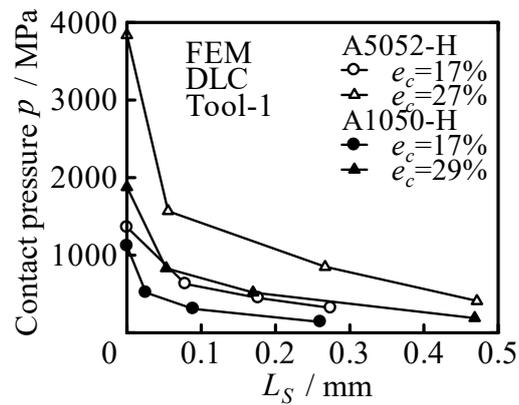


Fig.3.95 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-1, H 材)

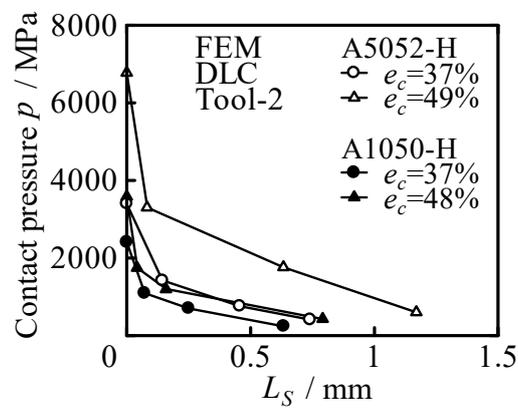


Fig.3.96 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-2, H 材)

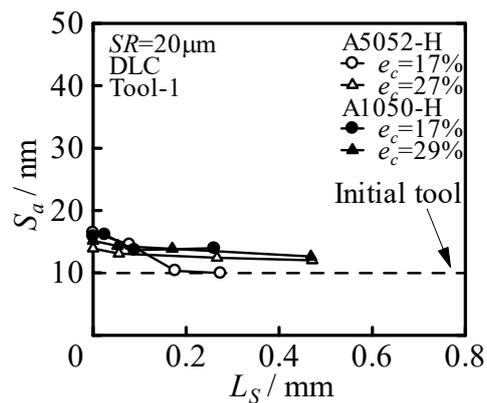


Fig.3.97 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-1, H 材)

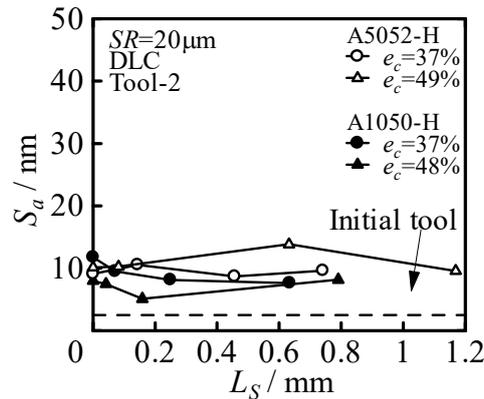


Fig.3.98 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-2, H 材)

3.7.2 A5052-H と C1020-H の比較

材料の違いによる平滑化の挙動を調べるため、DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った A5052-H の圧縮試験結果と過去に行った C1020-H の圧縮試験結果⁽²¹⁾の比較、DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った A5052-H の圧縮試験結果と過去に行った C1020-H の圧縮試験結果⁽²¹⁾の比較を行う。

3.7.2.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.99 に各条件における触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの圧縮率においても C1020-H の方が R_a が小さいことがわかる。

Fig.3.100 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの圧縮率においても C1020-H の方が平均面圧が大きくなっている。

Fig.3.101 に荷重 P と変位 S_r の関係を示す。いずれの条件においても C1020-H の方が荷重が大きくなっている。

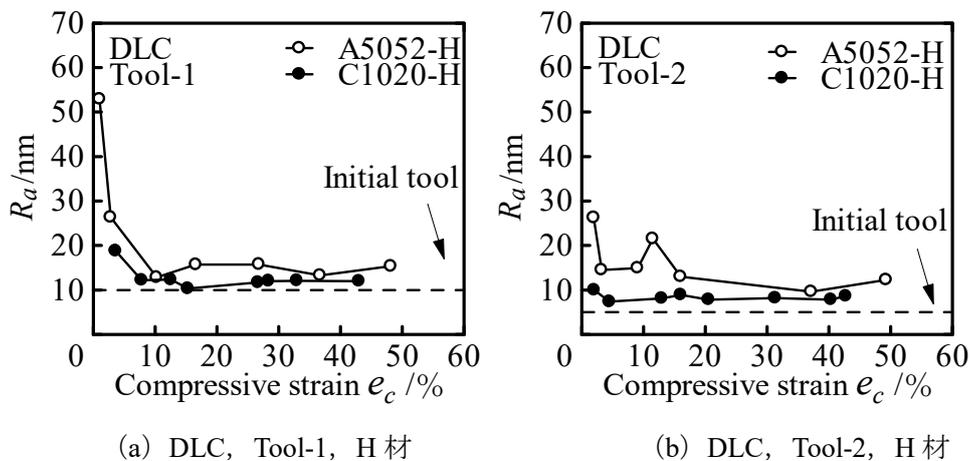
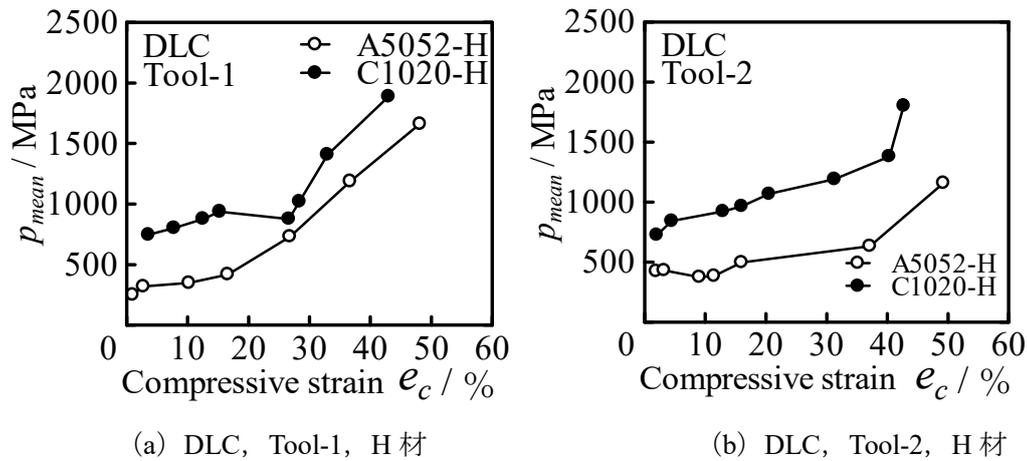
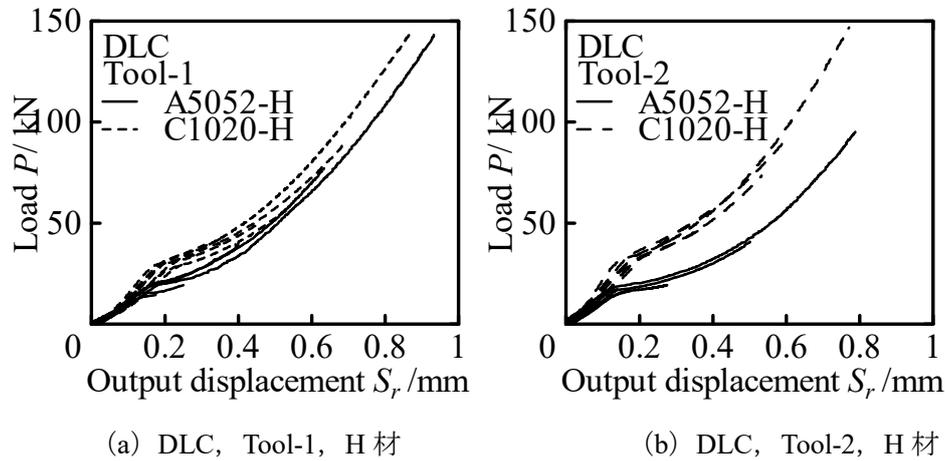


Fig.3.99 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係

Fig.3.100 平均面圧 P_{mean} と圧縮率 e_c の関係Fig.3.101 荷重 P と変位 S_r の関係

3.7.2.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

Fig.3.102 に Tool-1 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの測定箇所においても, 低圧縮率では C1020-H の方が平滑化が進む傾向が見られるが, 高圧縮率では A5052-H と C1020-H の間にほとんど違いは見られない. これは C1020-H の方が変形抵抗が大きく面圧が高くなり, 転写効果の影響が大きく, 滑化が進むが, 高圧縮率では A5052-H, C1020-H とともに初期工具粗さ程度まで平滑化が進むためと考えられる.

Fig.3.103 に DLC, Tool-2 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの測定箇所においても低圧縮率では C1020-H の方が S_a が小さくなっているが, 高圧縮率ではほとんど違いは見られない. これは, C1020-H の方が変形抵抗が大きく面圧が高くなり, 転写効果の影響が大きくなるが外周部においては, A5052-H, C1020-H とともに面圧による転写効果よりも材料流動による平滑効果が大きいため

と考えられる。

Fig.3.104 に Tool-1 の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。いずれの測定箇所においても低圧縮率では C1020-H の方が S_a が小さくなっているが、高圧縮率ではほとんど違いは見られない。

Fig.3.105 に Tool-2 の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。いずれの測定箇所においても低圧縮率では C1020-H の方が S_a が小さくなっているが、高圧縮率ではほとんど違いは見られない。

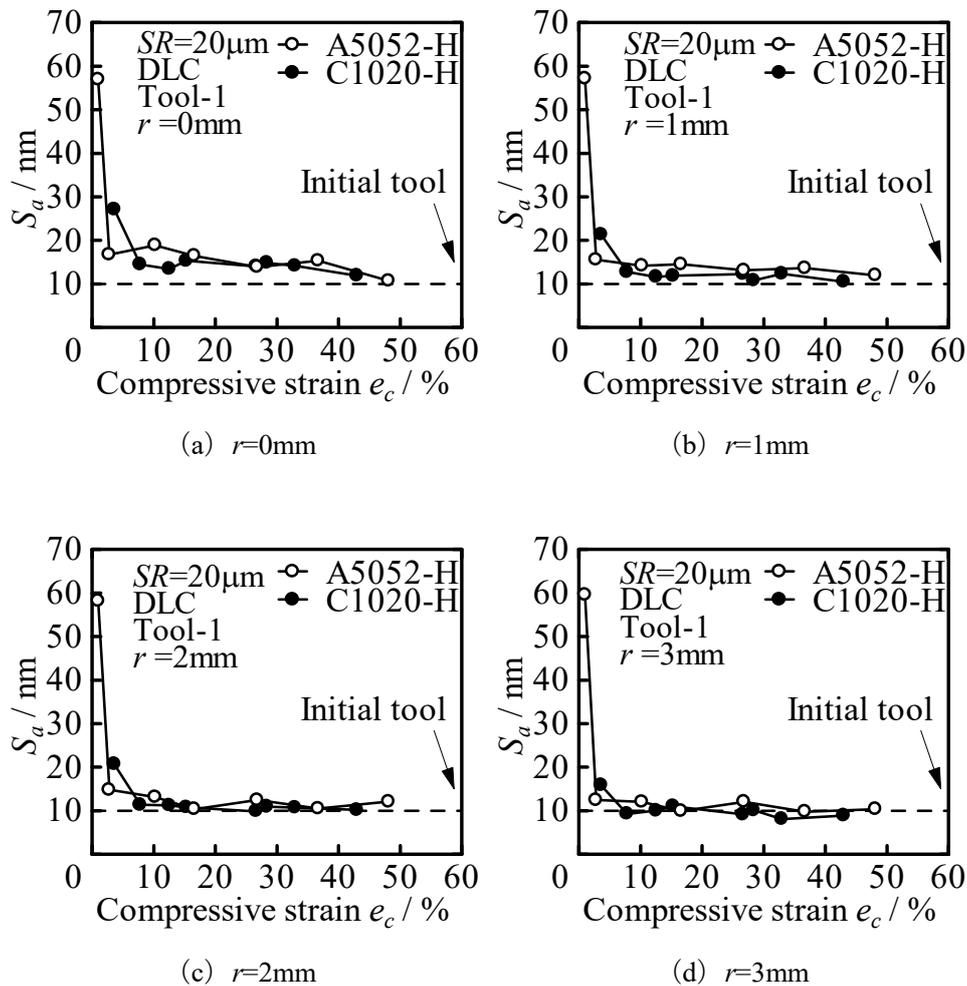
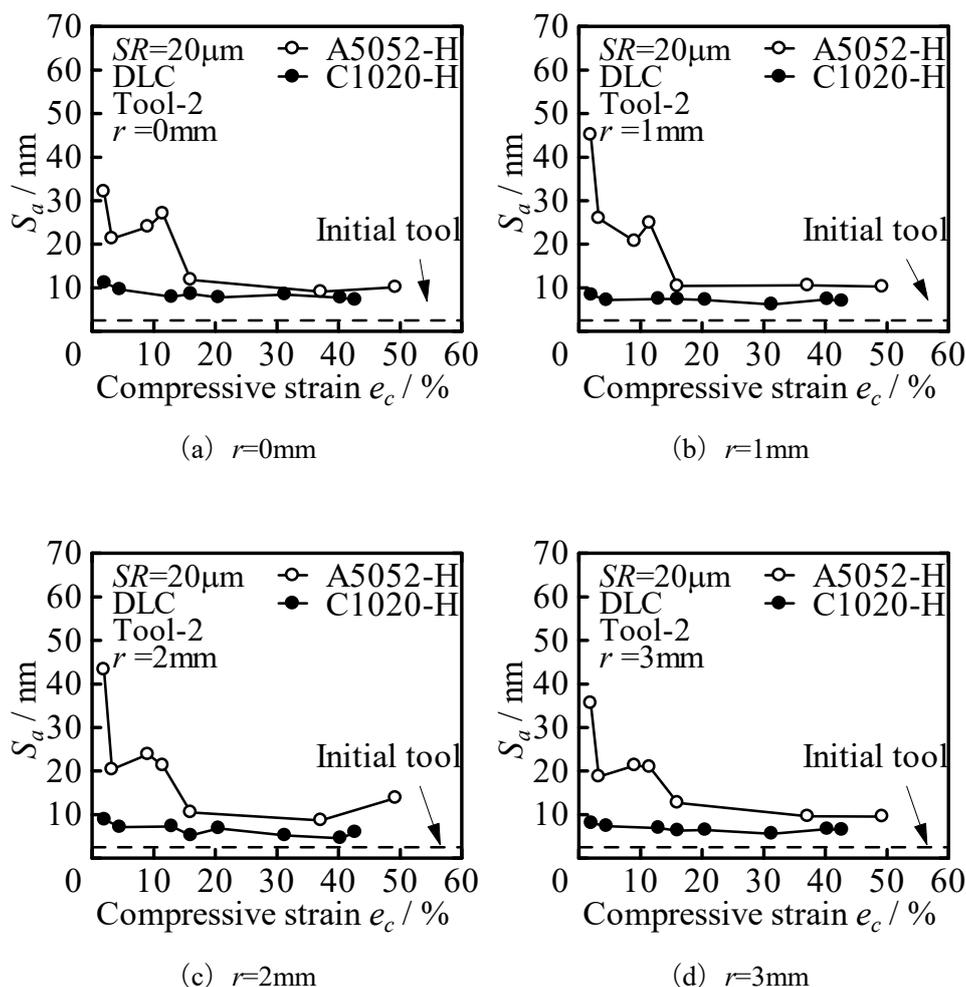
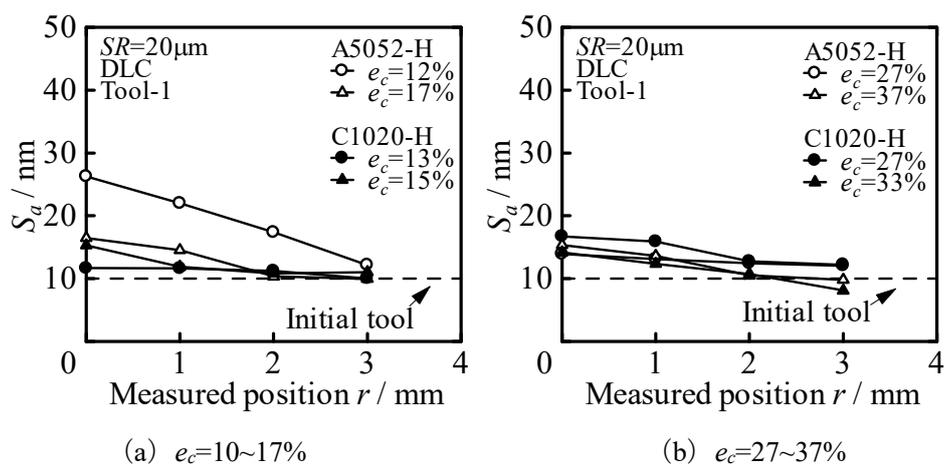


Fig.3.102 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, H 材)

Fig.3.103 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, H 材)Fig.3.104 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-1, H 材)

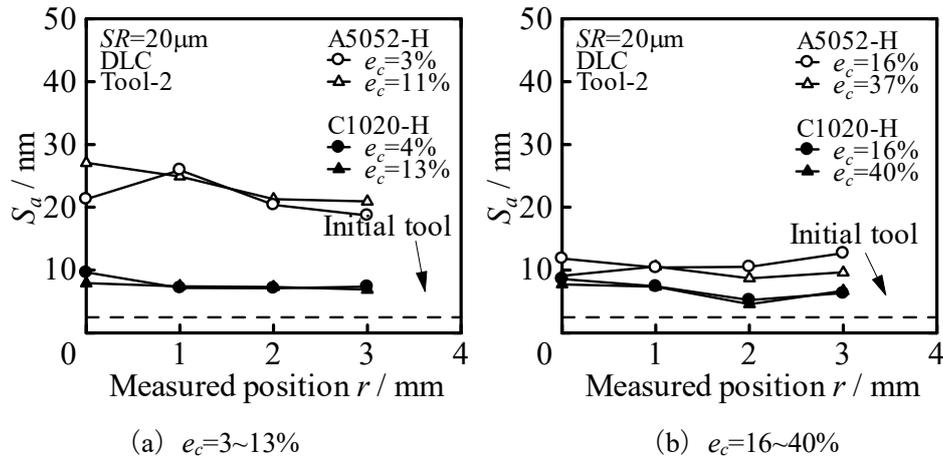


Fig.3.105 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-2, H材)

3.7.2.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

Fig.3.106 に Tool-1 での FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。同程度の圧縮率では C1020-H の方が面圧が大きくなっていることがわかる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.107 に Tool-2 での FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。同程度の圧縮率では C1020-H の方が面圧が大きくなっていることがわかる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.108 に Tool-1 での算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。いずれの材料においてもすべり量による S_a の変化はあまり見られないことがわかる。

Fig.3.109 に Tool-2 での算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。A5052-H の低圧縮率ではすべり量が増えるにつれて S_a が小さくなる傾向が見られるが、それ以外では、いずれの材料においてもすべり量による S_a の変化はあまり見られないことがわかる。

以上より、Tool-1 の条件において、低圧縮率において C1020-H の方が平滑化が進む。また高圧縮率では測定箇所によらず大きな差は見られない。これは変形抵抗の大きい C1020-H の方が面圧による転写効果の影響が大きいからだと考えられる。

Tool-2 の条件において、C1020-H の方が平滑化が進んでいるが、高圧縮率になるにつれてその差は小さくなっている。

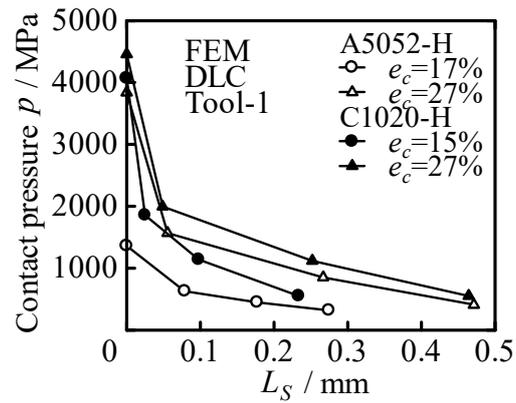


Fig.3.106 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-1, H材)

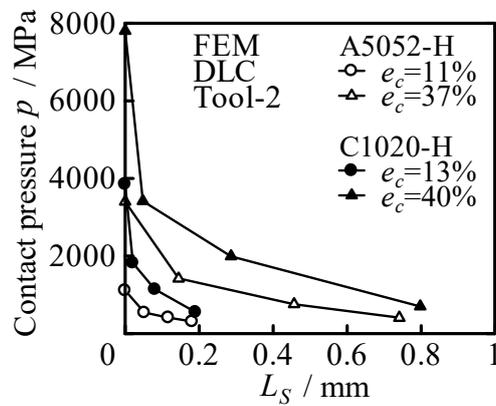


Fig.3.107 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-2, H材)

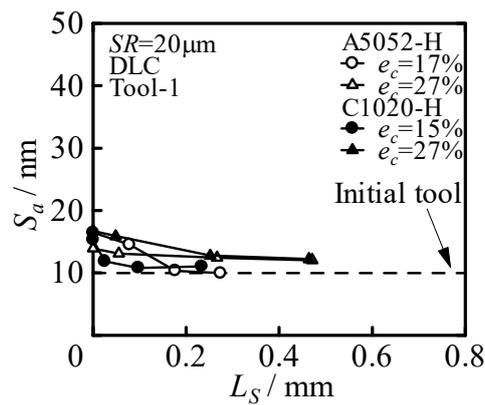


Fig.3.108 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-1, H材)

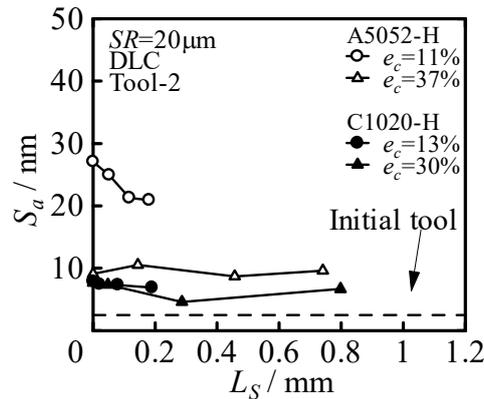


Fig.3.109 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_s の関係 (DLC, Tool-2, H 材)

3.7.3 A5052-O と A1050-O の比較

材料の違いによる平滑化の挙動を調べるため、DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った A5052-O の圧縮試験結果と過去に行った A1050-O の圧縮試験結果⁽¹⁸⁾の比較、DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った A5052-O の圧縮試験結果と過去に行った A1050-O の圧縮試験結果⁽¹⁸⁾の比較を行う。

3.7.3.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.110 に各条件における触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの圧縮率においても材料の違いによる差はほとんど見られない。

Fig.3.111 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。低圧縮率では A5052-O の方が面圧が大きくなるが、高圧縮率では面圧はほとんど同じになることがわかる。

Fig.3.112 に荷重 P と変位 S_r の関係を示す。いずれの条件においても $S_r=0.2\text{--}0.6\text{mm}$ においては A5052-O の方が荷重は大きくなるが、それ以降は荷重はほとんど等しくなっていることがわかる。

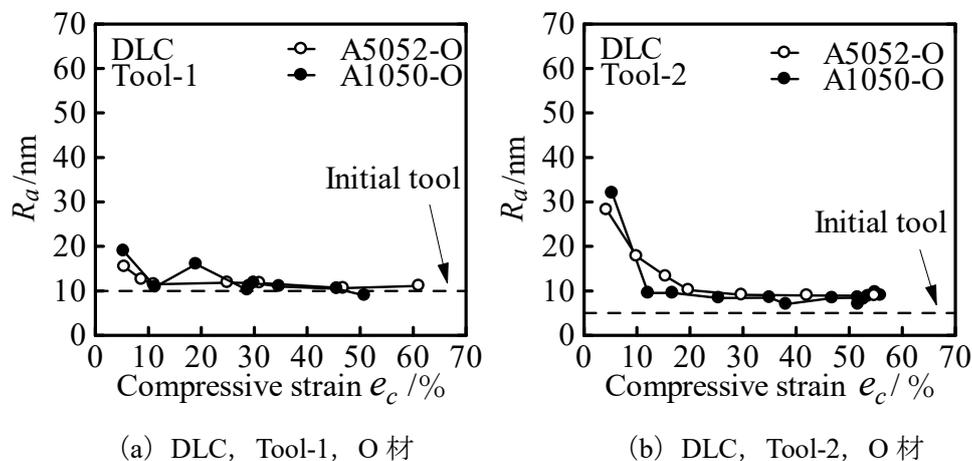
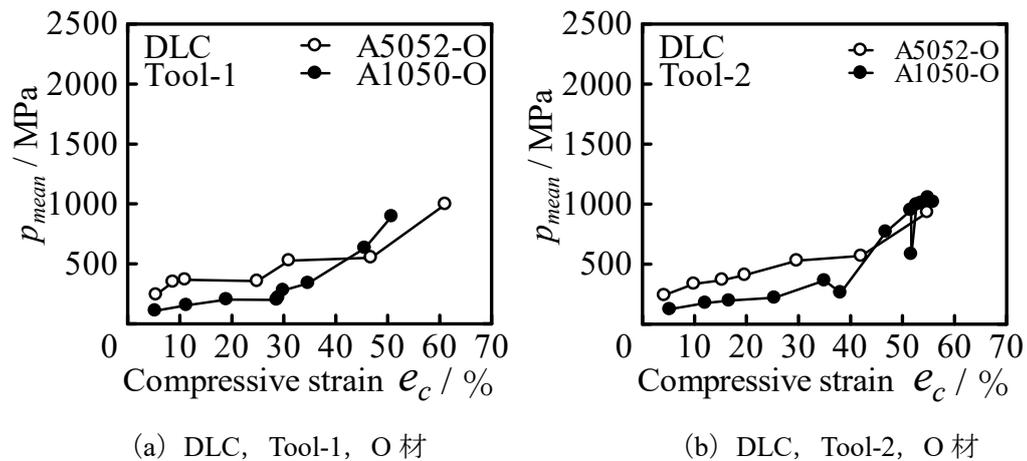
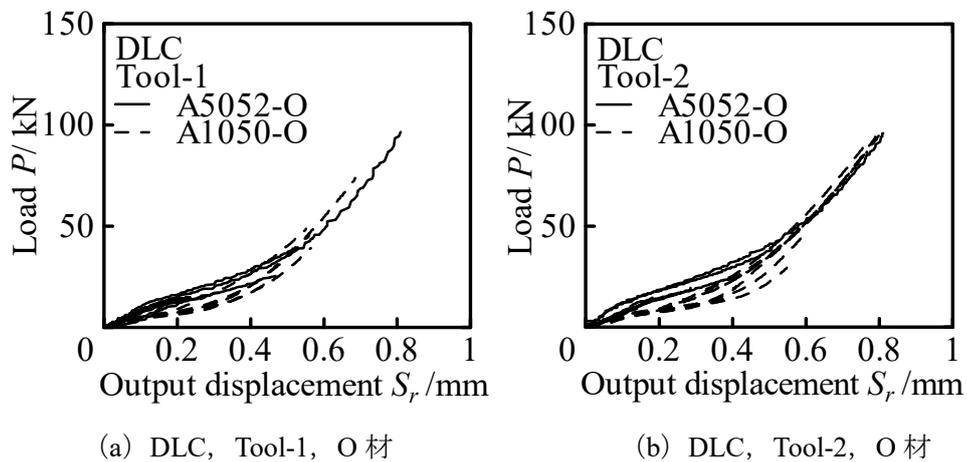


Fig.3.110 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係

Fig.3.111 平均面圧 P_{mean} と圧縮率 e_c の関係Fig.3.112 荷重 P と変位 S_r の関係

3.7.3.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

Fig.3.113 に Tool-1 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。低圧縮率において中心部では大きな差は見られないが、外周部では A5052-O の方が S_a が小さくなっている。これは変形抵抗の大きい A5052-O の方が面圧による転写効果の影響が大きいからだと考えられる。高圧縮率では測定箇所によらず大きな差は見られない。

Fig.3.114 に Tool-2 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す。測定箇所によらず大きな違いは見られない。

Fig.3.115 に DLC, Tool-1 の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。A5052-O と A1050-O のどちらも外周部で S_a が小さくなる傾向が見られる。低圧縮率では A5052-O のほうが平滑化が進むことがわかる。

Fig.3.116 に Tool-2 の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す。A5052-

O と A1050-O の間に大きな差は見られない。

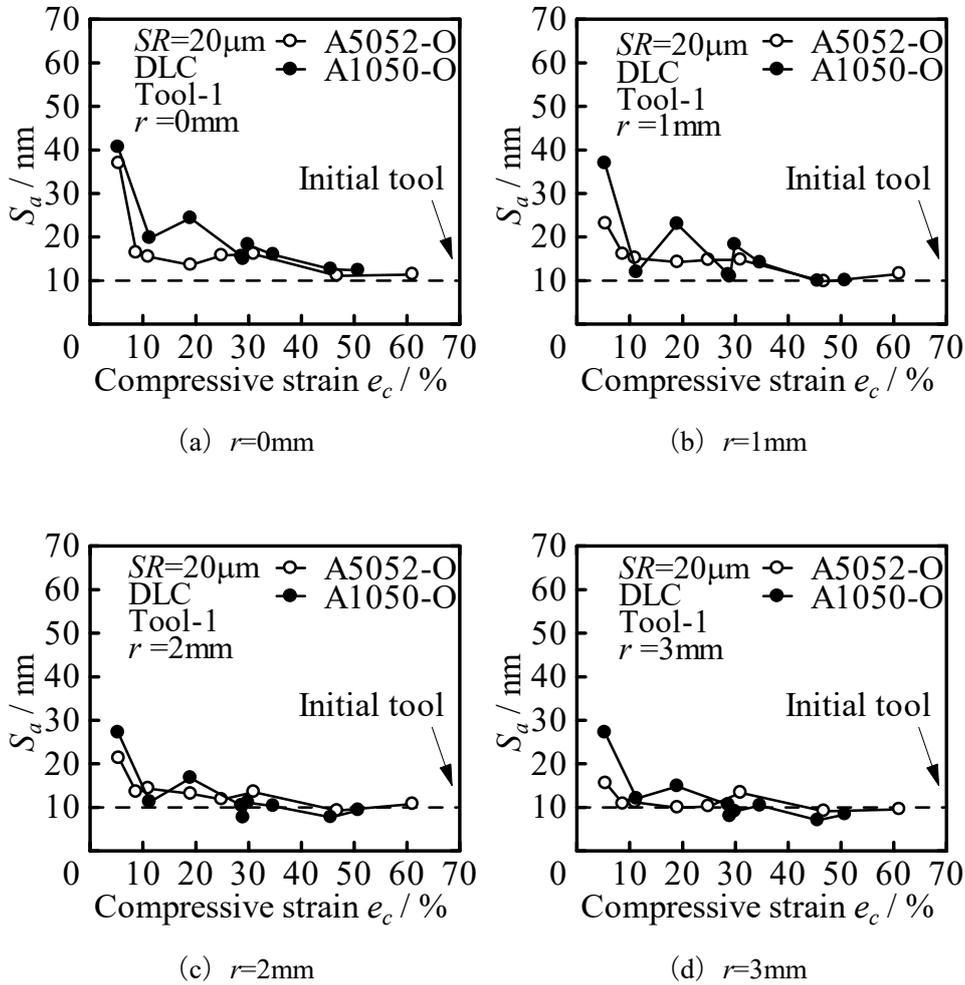


Fig.3.113 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, O 材)

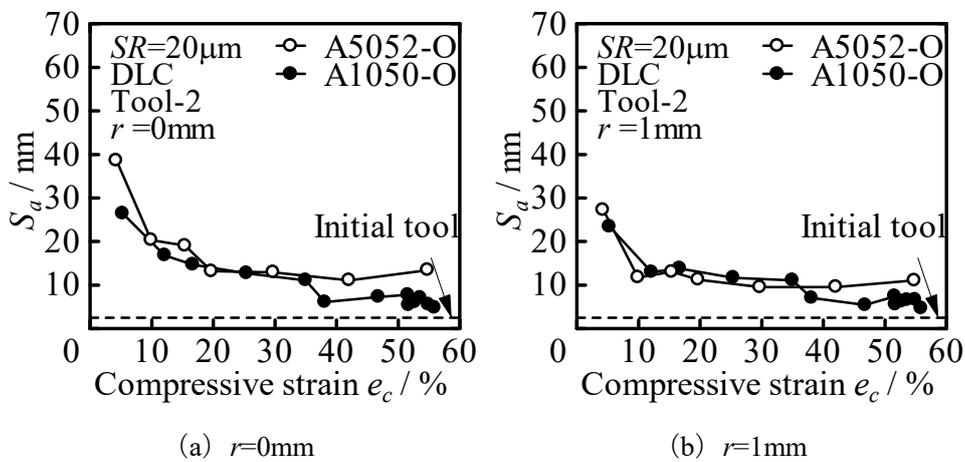


Fig.3.114 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, O 材)

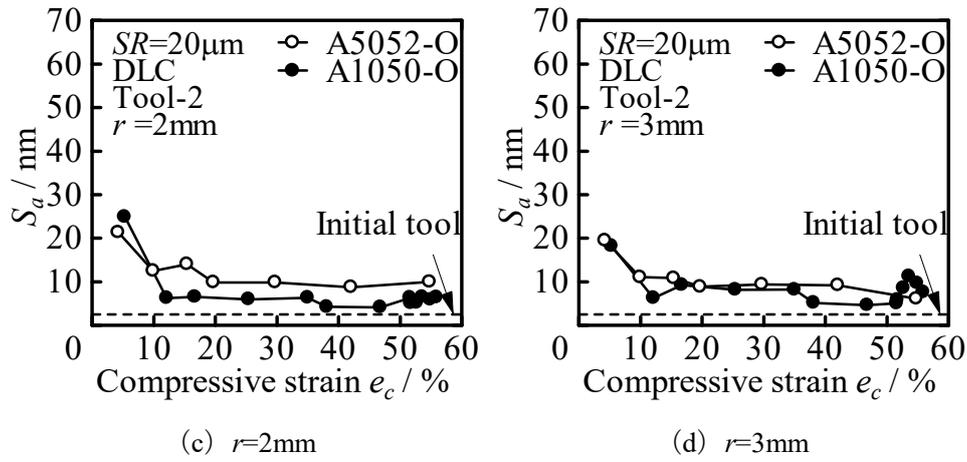


Fig.3.114 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, O 材)

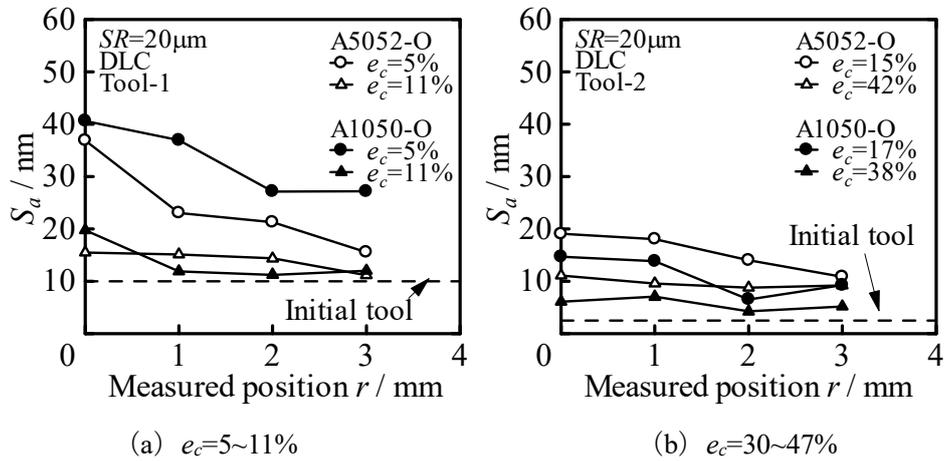


Fig.3.115 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-1, O 材)

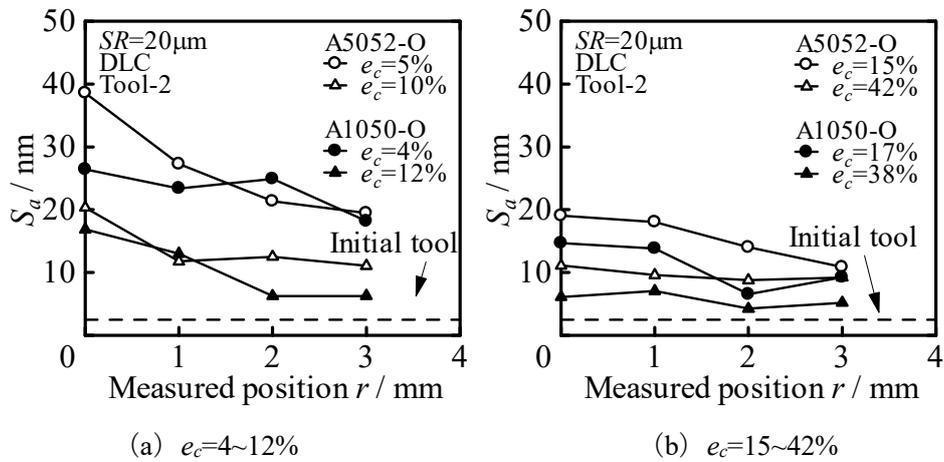


Fig.3.116 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-2, O 材)

3.7.3.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

Fig.3.117に Tool-1 での FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。同程度の圧縮率では A5052-O の方が面圧が大きくなっていることがわかる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.118に Tool-2 での FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。同程度の圧縮率では A5052-O の方が面圧が大きくなっていることがわかる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.119に Tool-1 での算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。A5052-O の方がすべり量による S_a の変化が大きいことがわかる。

Fig.3.120に Tool-2 での算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。いずれの材料においてもすべり量による S_a の変化はあまり見られないことがわかる。

以上より、Tool-1 の条件において、低圧縮率で A5052-O の方が平滑化が進む傾向が見られた。

Tool-2 の条件において、材料による大きな違いは見られなかった。

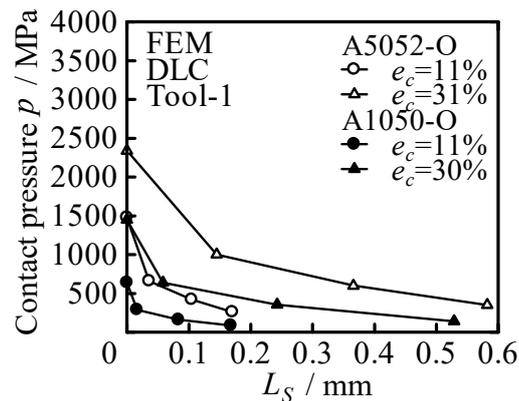


Fig.3.117 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-1, O材)

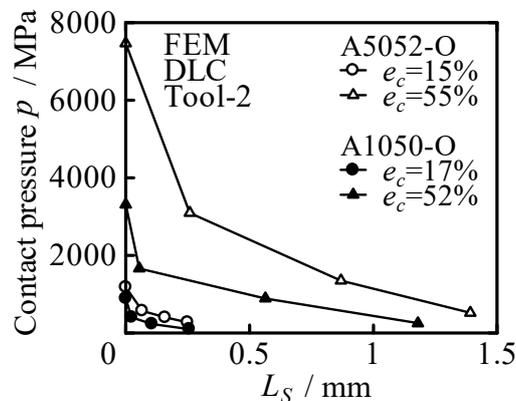


Fig.3.118 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-2, O材)

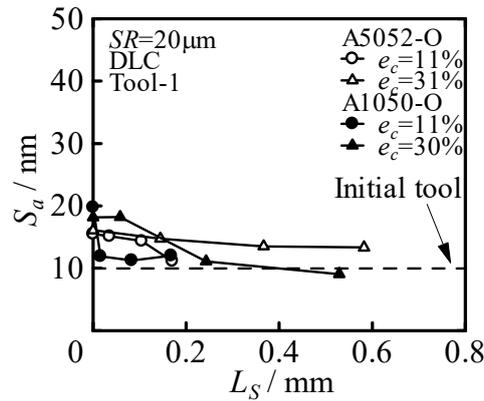


Fig.3.119 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-1, O材)

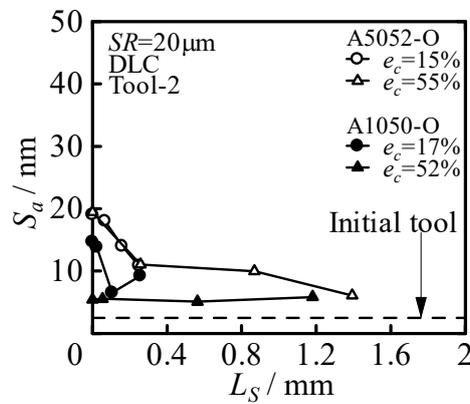


Fig.3.120 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-2, O材)

3.7.4 A5052-O と C1020-O の比較

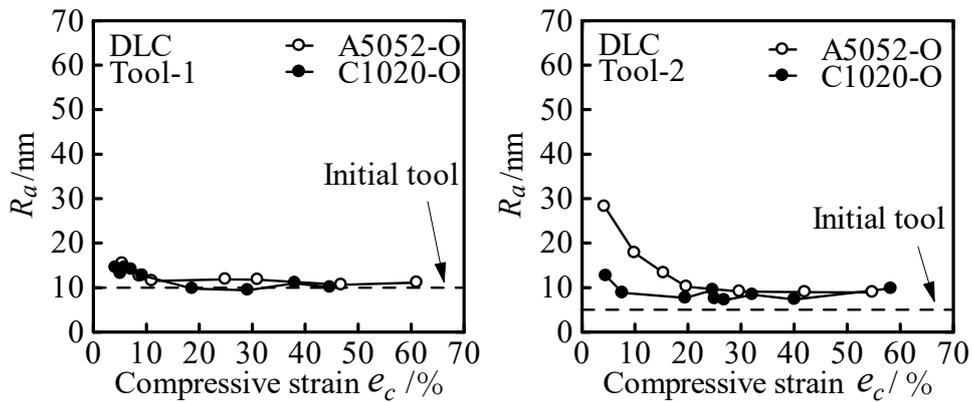
材料の違いによる平滑化の挙動を調べるため、DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った A5052-O の圧縮試験結果と過去に行った C1020-O の圧縮試験結果⁽²¹⁾の比較、DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った A5052-O の圧縮試験結果と過去に行った C1020-O の圧縮試験結果⁽²²⁾の比較を行う。

3.7.4.1 圧縮率と表面粗さの関係

Fig.3.121 に各条件における触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す。Tool-2 の低圧縮率において、C1020-O の方が R_a が小さいことがわかる。

Fig.3.122 に平均面圧 p_{mean} と圧縮率 e_c の関係を示す。高圧縮率において、C1020-O の方が平均面圧が大きくなっている。

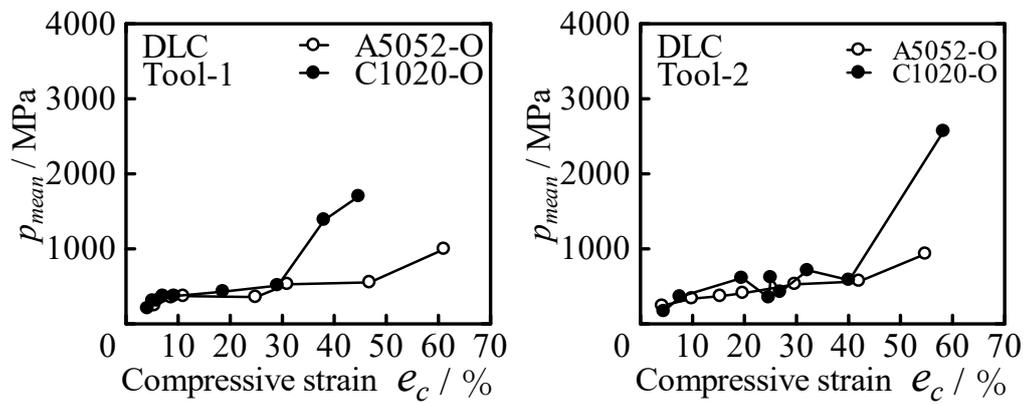
Fig.3.123 に荷重 P と変位 S_r の関係を示す。Tool-1 において、C1020-O の方が荷重が大きくなっている。



(a) DLC, Tool-1, O 材

(b) DLC, Tool-2, O 材

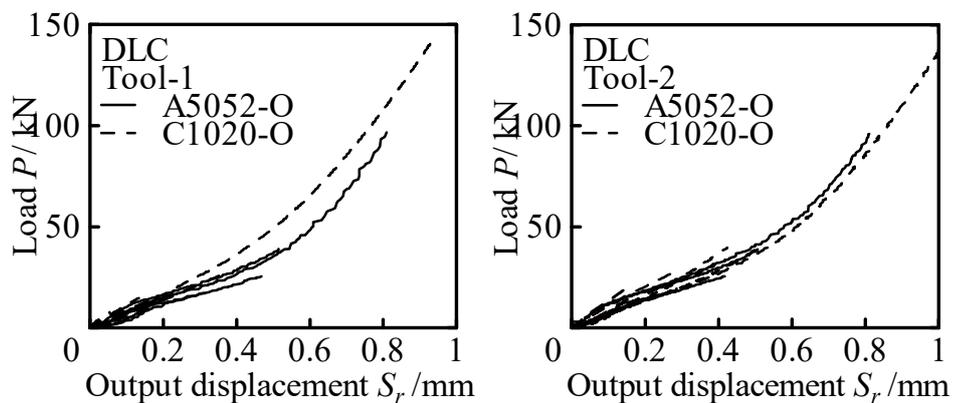
Fig.3.121 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係



(a) DLC, Tool-1, O 材

(b) DLC, Tool-2, O 材

Fig.3.122 平均面圧 P_{mean} と圧縮率 e_c の関係



(a) DLC, Tool-1, H 材

(b) DLC, Tool-2, H 材

Fig.3.123 荷重 P と変位 S_r の関係

3.7.4.2 原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察と評価

Fig.3.124 に Tool-1 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの測定箇所においても, 低圧縮率の中心部では C1020-O の方が平滑化が進む傾向が見られるが, 高圧縮率では A5052-O と C1020-O の間にほとんど違いは見られない. これは C1020-O の方が変形抵抗が大きく面圧が高くなり, 転写効果の影響が大きく, 平滑化が進むが, 高圧縮率では A5052-O, C1020-O とともに初期工具粗さ程度まで平滑化が進むためと考えられる.

Fig.3.125 に Tool-2 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=1\text{mm}$, $r=2\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの測定箇所においても低圧縮率では C1020-O の方が S_a が小さくなっているが, 高圧縮率ではほとんど違いは見られない. これは, C1020-O の方が変形抵抗が大きく面圧が高くなり, 転写効果の影響が大きくなるが外周部においては, A5052-O, C1020-O とともに面圧による転写効果よりも材料流動による平滑効果が大きいためと考えられる.

Fig.3.126 に Tool-1 の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. 低圧縮率の中心部では C1020-O の方が S_a が小さくなっているが, 高圧縮率ではほとんど違いは見られない.

Fig.3.127 に Tool-2 の圧縮率ごとの算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係を示す. いずれの測定箇所においても低圧縮率では C1020-O の方が S_a が小さくなっているが, 高圧縮率ではほとんど違いは見られない.

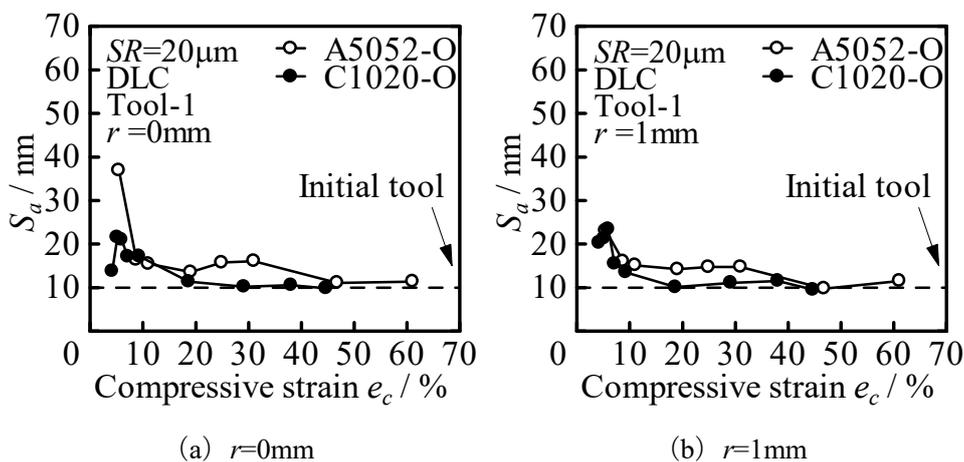


Fig.3.124 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, O 材)

Fig.3.125 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, O 材)

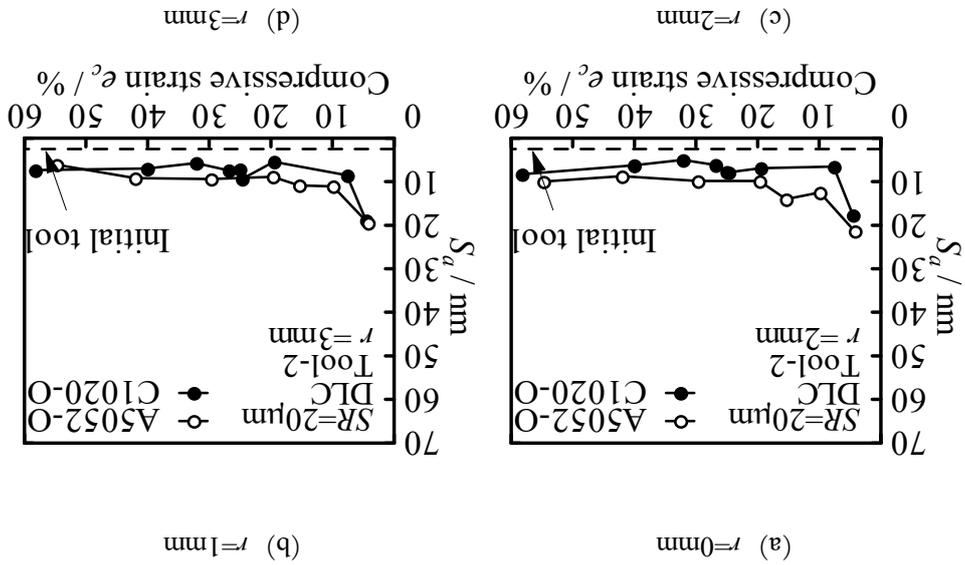
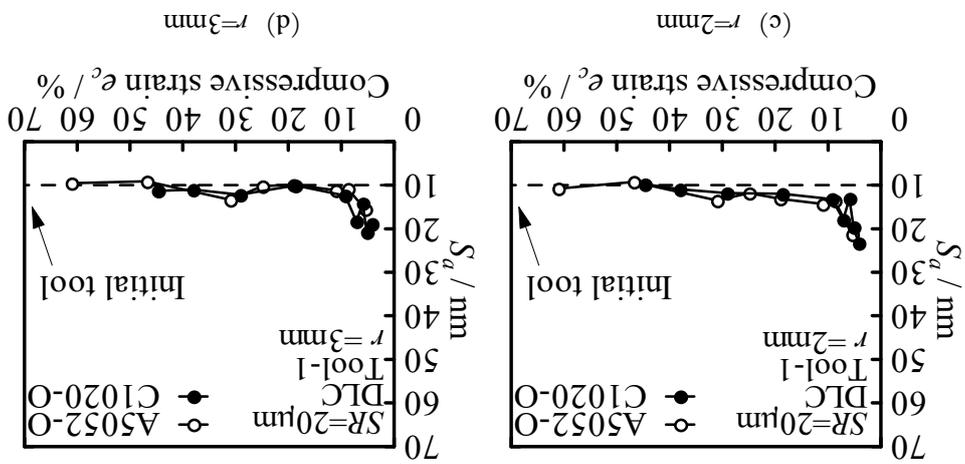
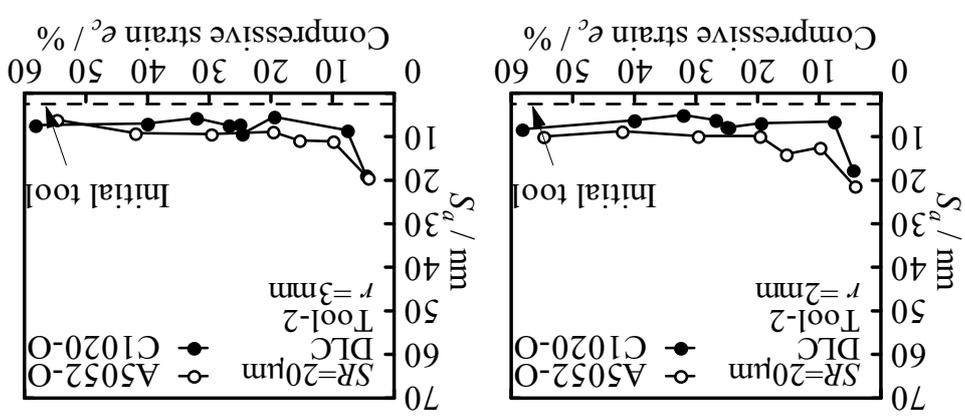
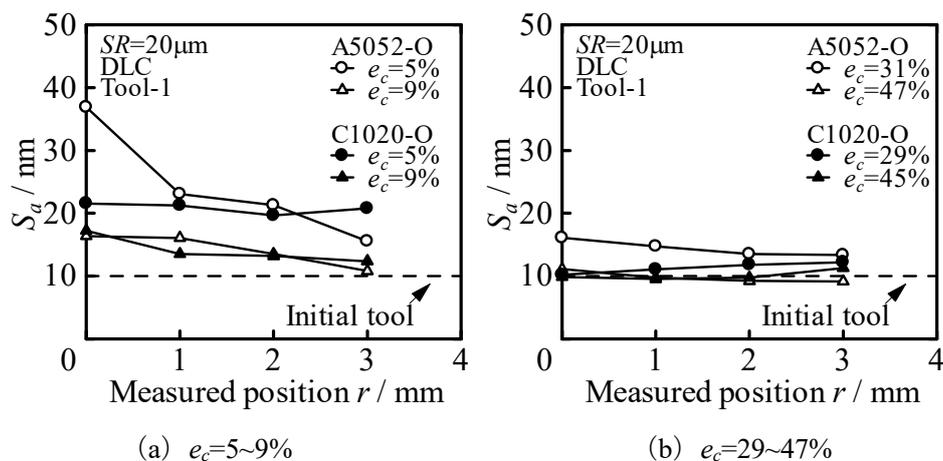
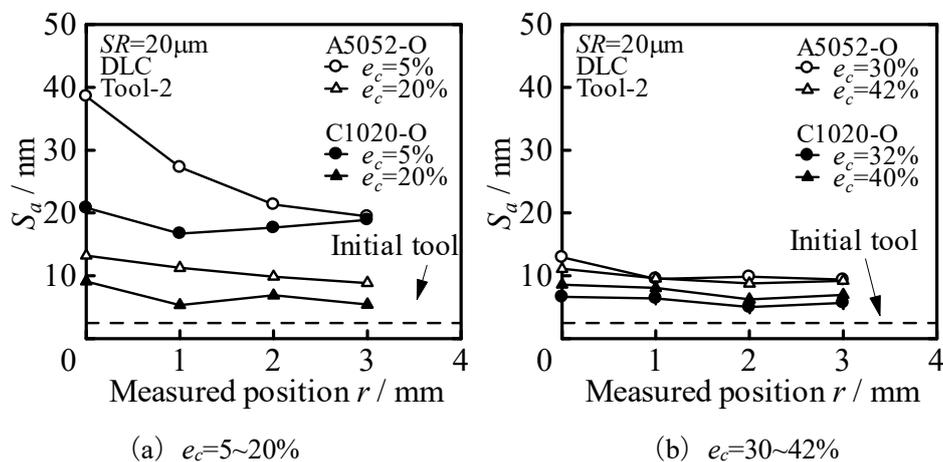


Fig.3.124 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, O 材)



(c) $r=2\text{mm}$



Fig.3.126 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-1, O材)Fig.3.127 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-2, O材)

3.7.4.3 有限要素法 (FEM) 解析結果

Fig.3.128 に Tool-1 での FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。同程度の圧縮率にほとんど差はないことがわかる。

Fig.3.129 に Tool-2 での FEM 解析による工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係を示す。低圧縮率の中心部では C1020-O の方が面圧が大きくなっていることがわかる。また、すべり量が大きくなるとその差は小さくなる傾向が見られる。

Fig.3.130 に Tool-1 での算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。いずれの材料においてもすべり量による S_a の変化はあまり見られないことがわかる。

Fig.3.131 に Tool-2 での算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係を示す。いずれの材料においてもすべり量による S_a の変化はあまり見られないことがわかる。

以上より、Tool-1 の条件において、低圧縮率の中心部において C1020-O の方が平滑化が進んでいる。また高圧縮率では測定箇所によらず大きな差は見られない。これは変形抵抗の

大きい C1020-O の方が面圧による転写効果の影響が大きいからだと考えられる。

Tool-2 の条件において、C1020-O の方が平滑化が進んでいるが、高圧縮率になるにつれてその差は小さくなっている。

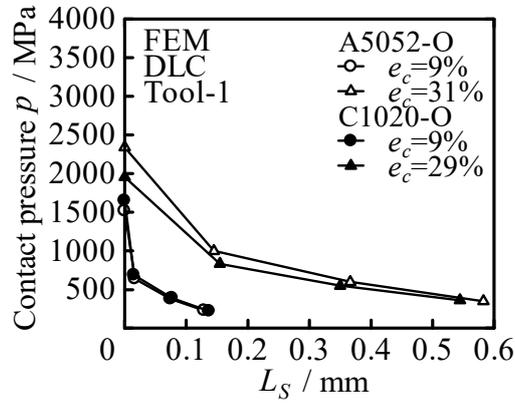


Fig.3.128 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-1, O 材)

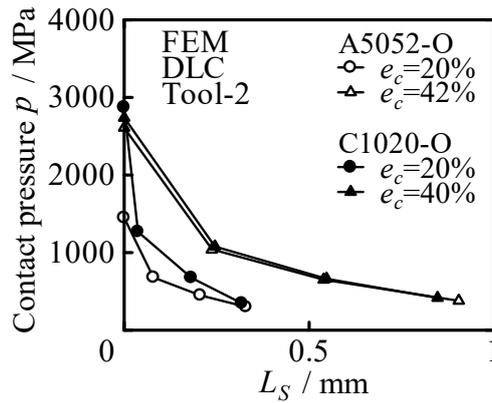


Fig.3.129 工具接触面圧 p と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-2, O 材)

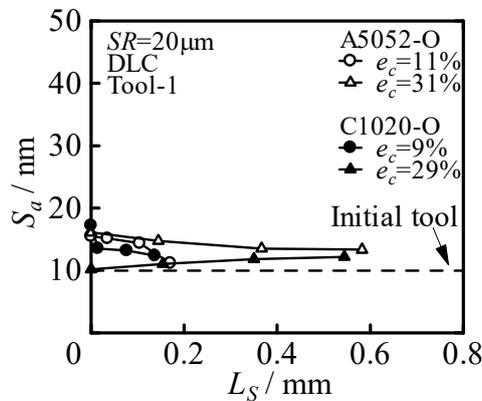


Fig.3.130 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-1, O 材)

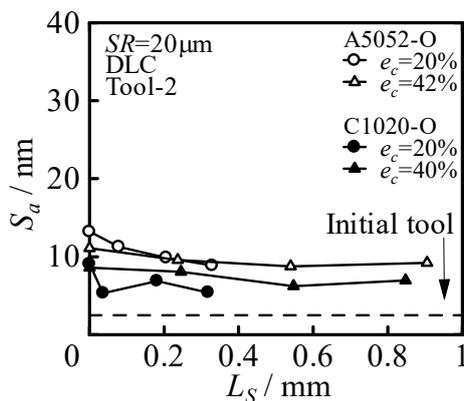


Fig.3.131 算術平均面粗さ S_a と相対すべり量 L_S の関係 (DLC, Tool-2, O 材)

3.8 まとめ

3章で比較を行った各条件による平滑化への影響を以下に示す.

Fig.3.132 に Tool-1 における触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの条件においても, 平滑度にほとんど差は見られない.

Fig.3.133 に Tool-1 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係, Fig.3.134 に圧縮率 $e_c=5\%$ 程度における測定箇所 r と算術平均面粗さの S_a 関係を示す. 中心部において, 圧縮率 $e_c=10\%$ 程度まではアルミニウムの O 材の S_a が大きいことがわかる. これは加工初期の変形抵抗が小さいため面圧による転写効果の影響が小さいことが原因だと考えられる. それ以降の圧縮率や外周部においては条件の違いによる差はほとんど見られない.

Fig.3.135 に Tool-2 における触針式表面粗さ計より得られた算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係, Fig.3.136 に圧縮率 $e_c=0-15\%$ における算術平均粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 低圧縮率ではアルミニウムの O 材の R_a が大きいことがわかる. これは加工初期の変形抵抗が小さいため面圧による転写効果の影響が小さいことが原因だと考えられる. 圧縮率が大きくなるにつれて, いずれの条件においても $R_a=7-10\text{nm}$ 程度まで平滑化されそれ以降は平滑化が進まないことがわかる.

Fig.3.137 に Tool-2 の測定箇所 $r=0\text{mm}$, $r=3\text{mm}$ の算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係を示す. 銅は圧縮率 $e_c=10\%$, アルミニウムは圧縮率 $e_c=20\%$ まで平滑化が進み, それ以降は平滑化は進まない. また, いずれの条件においても $S_a=10\text{nm}$ 程度まで平滑化され, それ以上平滑化は進まないことがわかる.

以上より, 工具表面粗さの影響について, 工具表面の算術平均粗さが小さいほど平滑化が進む. 加工硬化の影響について, 低圧縮率において H 材の方が平滑化が進む傾向が見られる. 高圧縮率においては加工硬化による差はほとんど見られない. 材料の影響について, アルミニウムに比べて銅の方が低圧縮率で平滑化が進むことがわかった. これは加工初期の変形抵抗が小さいため面圧による転写効果の影響が小さいことが原因だと考えられる.

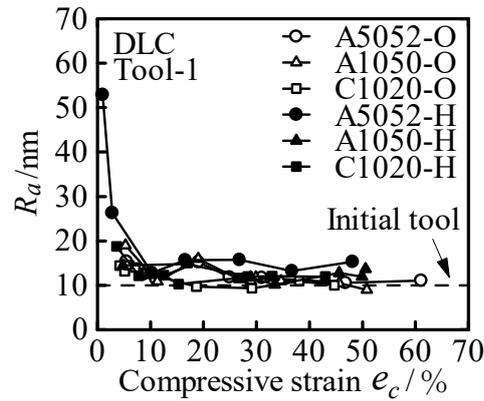


Fig.3.132 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1)

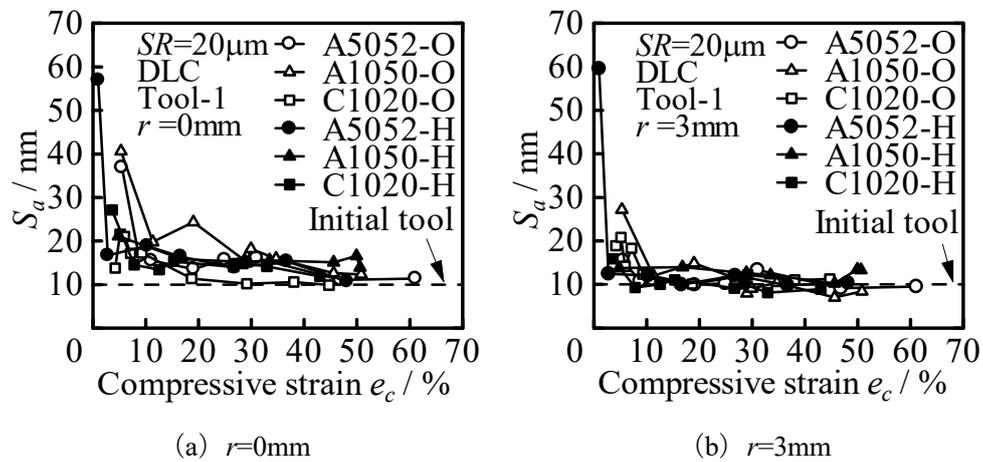


Fig.3.133 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1)

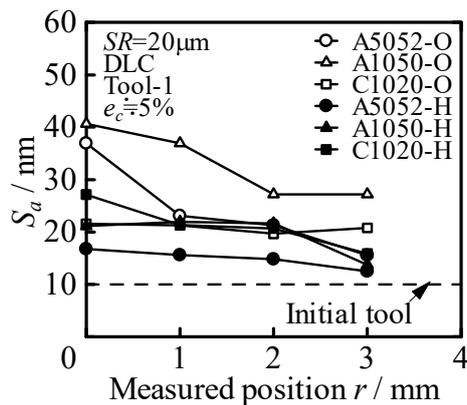
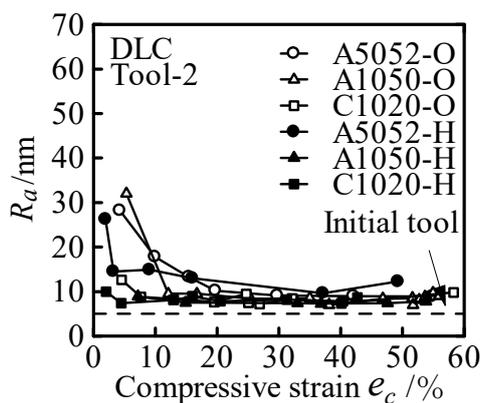
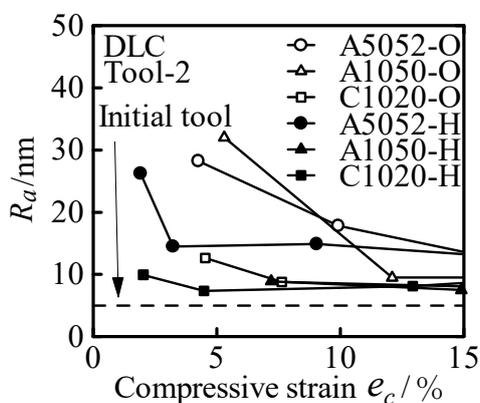
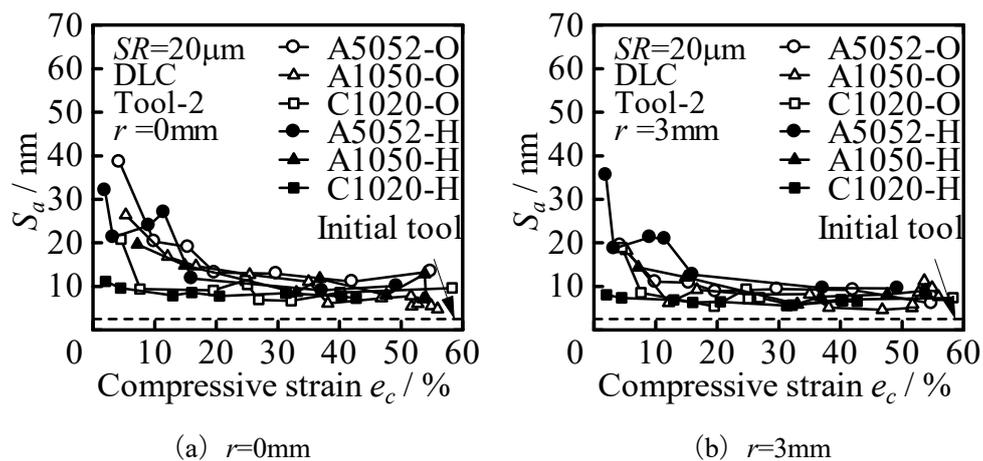


Fig.3.134 算術平均面粗さ S_a と測定箇所 r の関係 (DLC, Tool-1, $e_c \doteq 5\%$)

Fig.3.135 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2)Fig.3.136 算術平均面粗さ R_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2)Fig.3.137 算術平均面粗さ S_a と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2)

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⁽³⁴⁾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⁽³⁵⁾。

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⁽³⁶⁾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。

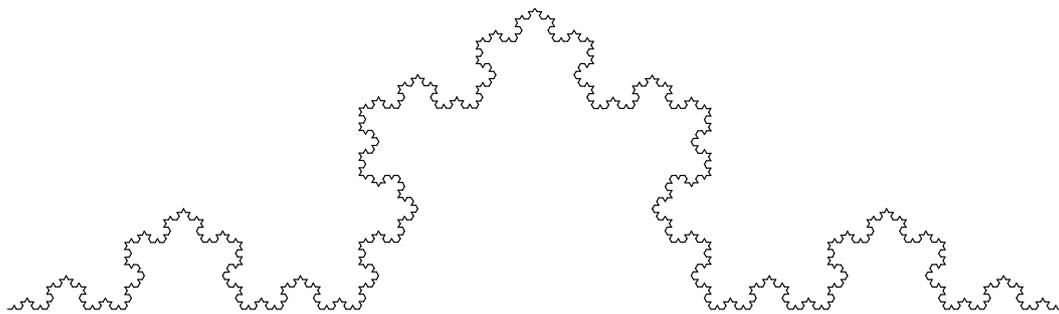


Fig.4.1 コッホ曲線

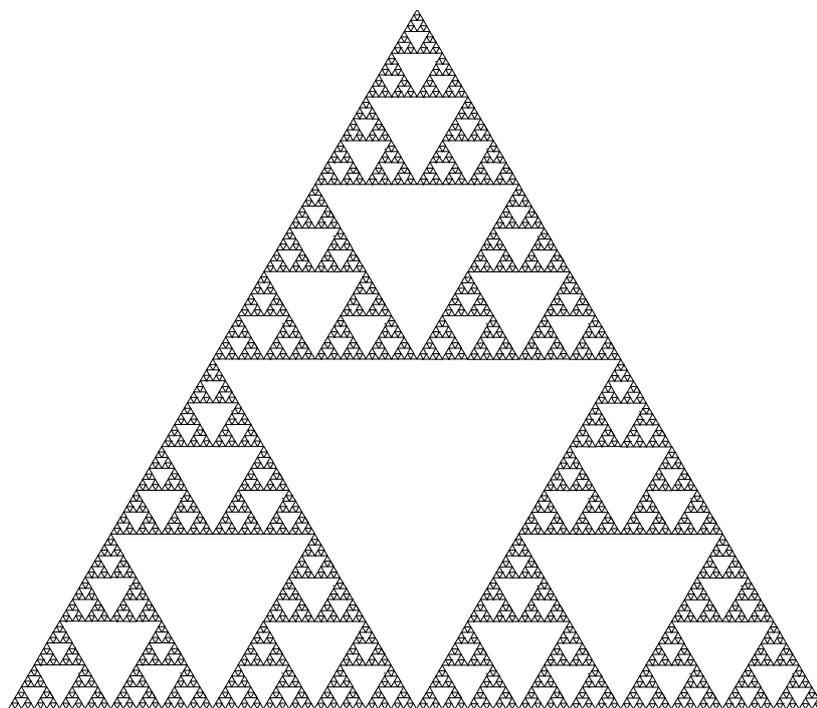


Fig.4.2 シルピンスキーのギャスケット



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」⁽³⁷⁾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⁽³⁵⁾。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⁽³⁵⁾。

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

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

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

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

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

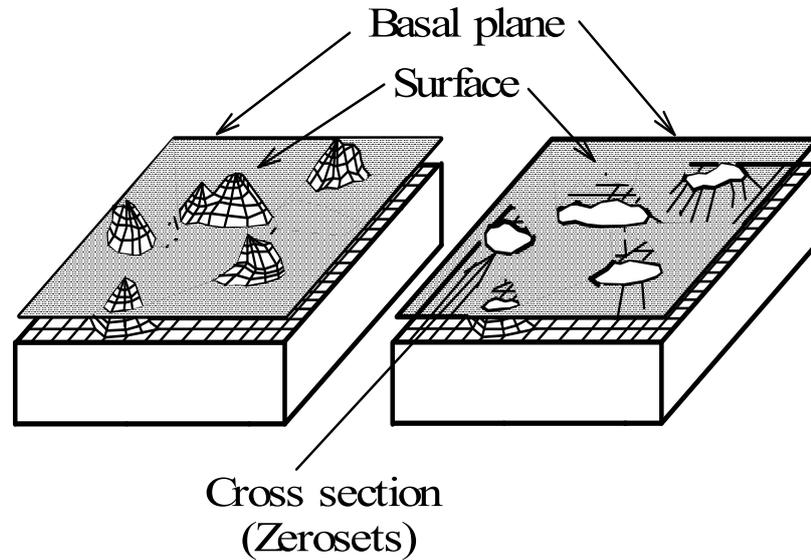


Fig.4.4 零点集合法の概要

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

4.2.2 パワースペクトル次元

パワースペクトル次元とは、表面断面曲線に対して FFT 解析を行い、得られるパワースペクトル密度 S_p と波長 λ との関係から得られる。まず、フーリエ変換⁽³⁶⁾の説明から行う。

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

アナログ非周期信号 $x(t)$ に対するフーリエ変換は、

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

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

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

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

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

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

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

とおくと

$$X_k = A_k - jB_k$$

と書け、 A_k 、 B_k と X_k の関係は、

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

となる。 X_k の2乗値がパワースペクトルである。

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

次に、自己アフィンフラクタル曲線 $V_H(t)$ のスペクトル密度とフラクタル次元 D_{PS} の関係を、「フラクタルイメージ」⁽³⁶⁾より引用して以下に説明する。

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

ここで、 $X(t)$ をfBm関数とすると、適当にスケーリングされた関数

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

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

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

とし、以下のような表記法を用いる。

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

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

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

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

である。よって、 $Y(t, T)$ のスペクトル密度は

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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。

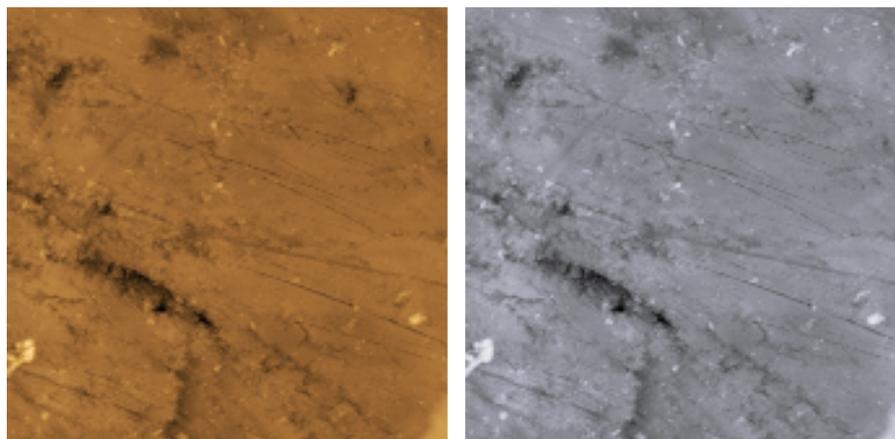
零点集合カット面をつくるには、色調が 256 階調で表されているグレー画像をしきい値で 2 値化しなくてはならない。この 2 値化のために AFM 画像の最大高さからのカット量を相対カット量として表すことにした。相対カット量 δ は次式で表される。

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

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大きな違いはない。

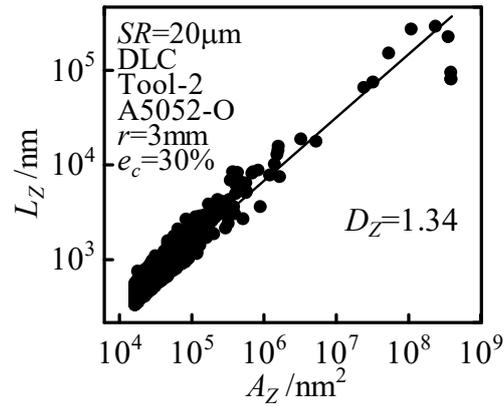
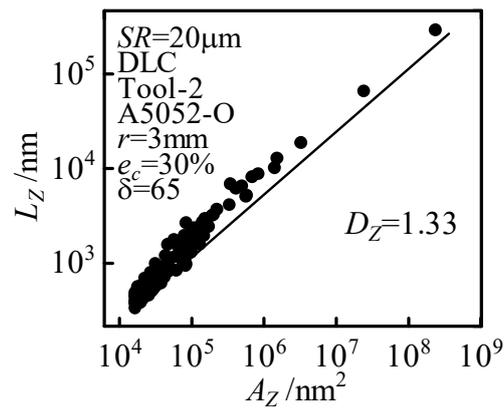
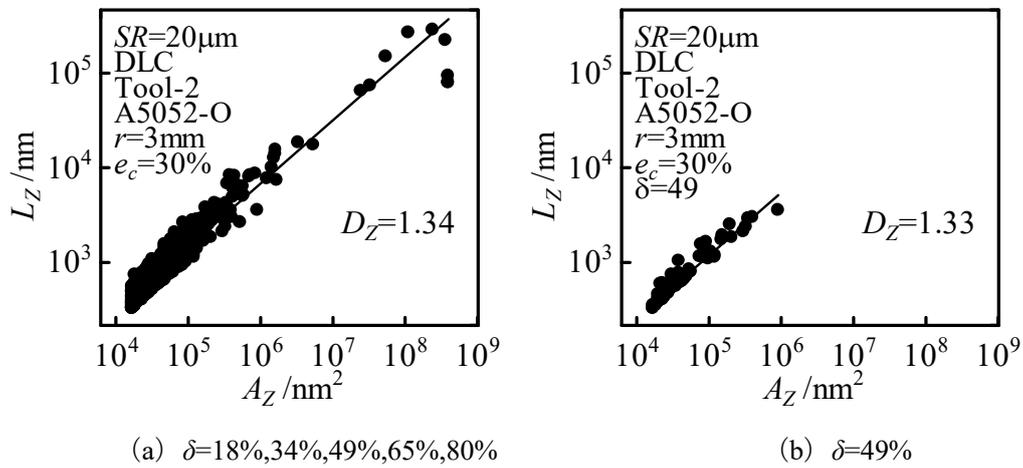


(a) AFM 画像

(b) グレー画像

(c) 2 値化画像 ($\delta=49\%$)

Fig.4.5 零点集合法における画像処理の流れ
($SR=20\mu\text{m}$, DLC, Tool-2, A5052-O, $e_c=30\%$)

Fig.4.6 周囲長 L_Z と面積 A_Z の関係 (DLC, Tool-2, A5052-O, $e_c=30\%$)(c) $\delta=65\%$ Fig.4.7 相対カット量の違いによる比較 (DLC, Tool-2, A5052-O, $e_c=30\%$)

4.3.2 パワースペクトル次元 D_{PS} の測定法

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

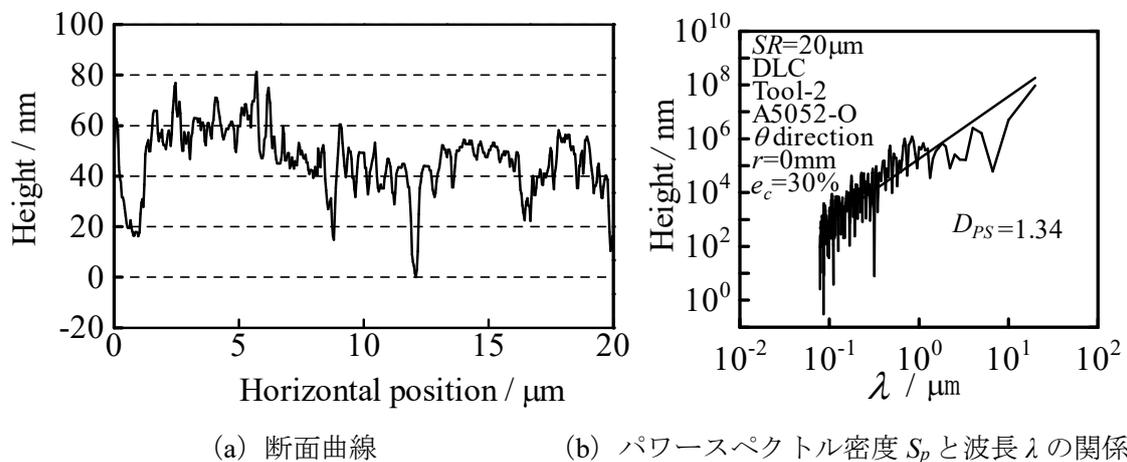


Fig.4.8 パワースペクトル法における処理の流れ (DLC, Tool-2, A5052-O, $e_c=30\%$)

4.4 DLC コーティング Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$), A5052-H における解析結果

4.4.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

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

Fig.4.10 に零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。圧縮率による D_Z の大きな変化は見られず、測定箇所による D_Z のばらつきは小さいことがわかる。

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

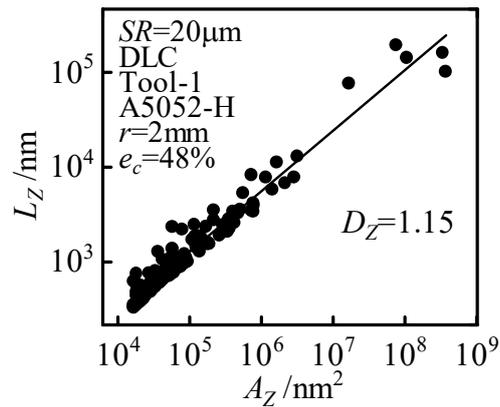


Fig.4.9 零点集合次元法による解析の一例 ($SR=20\mu\text{m}$, DLC, Tool-1, A5052-H, $e_c=48\%$)

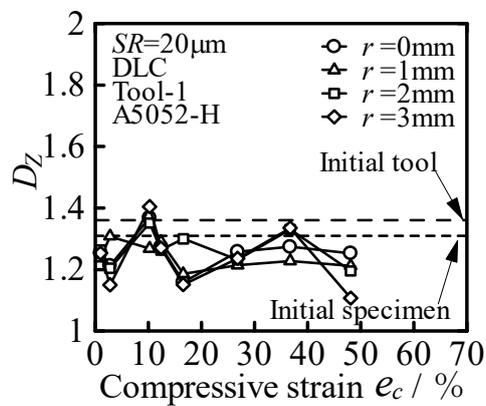


Fig.4.10 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H)

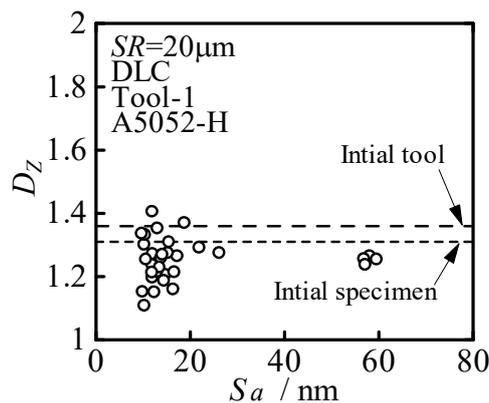


Fig.4.11 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H)

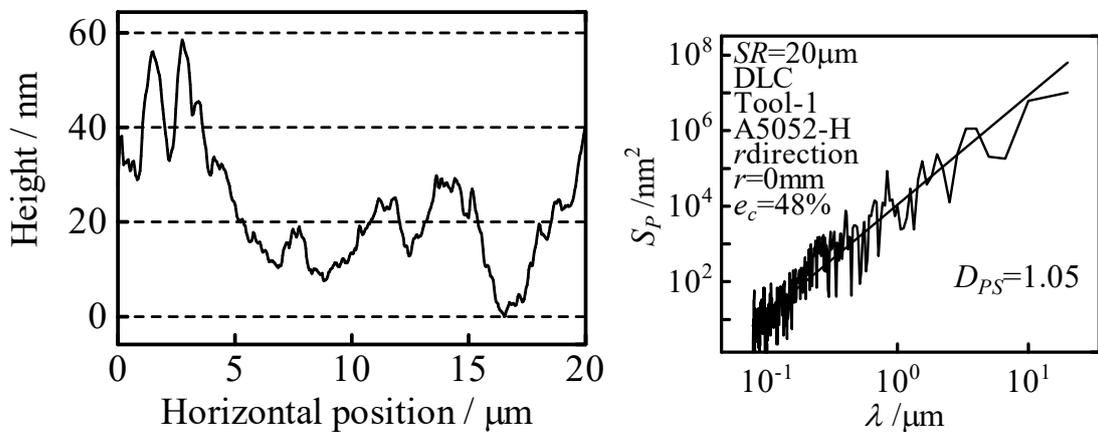
4.4.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

次に、パワースペクトル法によって表面細部の凹凸形状について検討する。Fig.4.12 に試験片表面の断面曲線と FFT 解析結果の一例を示す。パワースペクトル密度 S_p と波長 λ の関

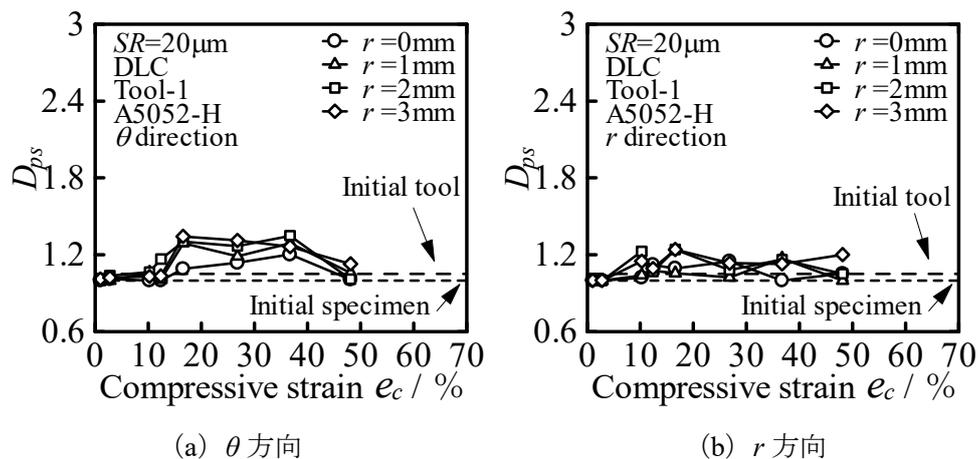
係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる. なお, 初期工具表面 (Tool-1) のパワースペクトル次元 $D_{PS}=1.05$, 初期試験片の $D_{PS}=1.00$ であった.

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

Fig.4.14 に θ 方向, r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに S_a が小さいときに D_{PS} のばらつきが大きい, θ 方向では, r 方向と比べて D_{PS} のばらつきが小さい. いずれにしても S_a が小さいと D_{PS} が大きくなる傾向がある.



(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.4.12 断面曲線および FFT 解析結果 (DLC, Tool-1, A5052-H, $r=2\text{mm}$, $e_c=48\%$)(a) θ 方向(b) r 方向Fig.4.13 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H)

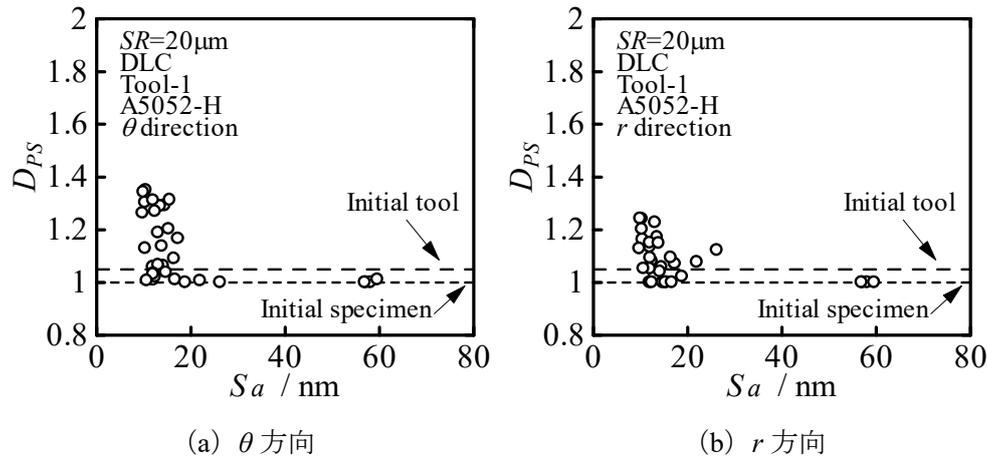


Fig.4.14 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-1, A5052-H)

4.5 DLC コーティング Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$), A5052-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. Fig.4.15 に解析の一例を示す. 周囲長 L_Z と面積 A_Z の関係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる. なお, 初期工具表面 (Tool-2) の零点集合次元 $D_Z=1.34$, 初期試験片表面の $D_Z=1.31$ である.

Fig.4.16 に零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す. D_Z のばらつきが大きく, はっきりとした規則性は見られない.

Fig.4.17 に零点集合次元 D_Z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. S_a が小さくなると D_Z のばらつきが大きくなる傾向が見られる.

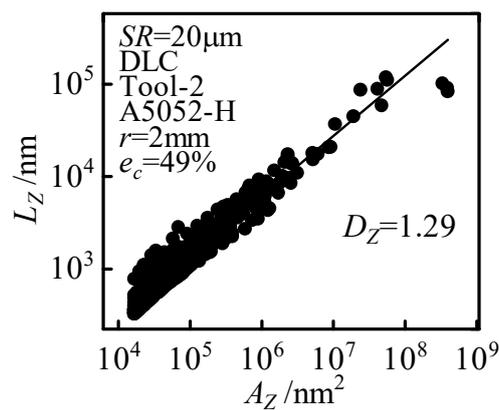


Fig.4.15 零点集合次元法による解析の一例 ($SR=20\mu\text{m}$, DLC, Tool-2, A5052-H, $e_c=49\%$)

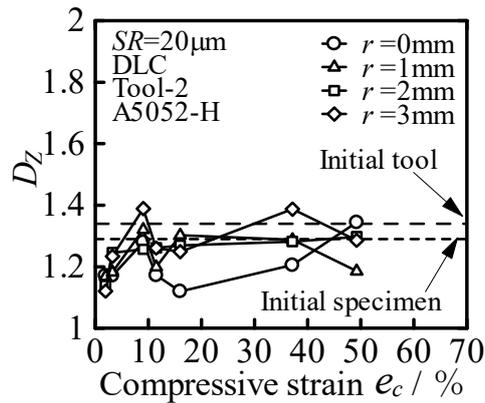


Fig.4.16 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H)

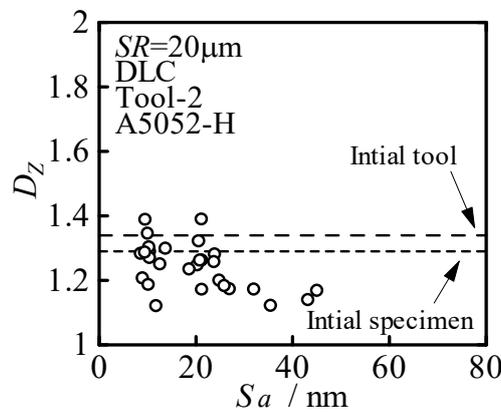


Fig.4.17 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H)

4.5.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

次に、パワースペクトル法によって表面細部の凹凸形状について検討する。Fig.4.18に試験片表面の断面曲線とFFT解析結果の一例を示す。パワースペクトル密度 S_p と波長 λ の関係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる。初期工具表面 (Tool-2) のパワースペクトル次元 $D_{PS}=1.38$ 、初期試験片表面の $D_{PS}=1.00$ であった。

Fig.4.19に θ 方向、 r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す。 θ 方向、 r 方向ともに圧縮率による D_z のばらつきが大きい。 r 方向では θ 方向と比べて測定個所による D_{PS} のばらつきが小さい。

Fig.4.20に θ 方向、 r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。 θ 方向、 r 方向ともに、 S_a が小さくなるほど D_{PS} のばらつきが大きい。 θ 方向では r 方向と比べて D_{PS} のばらつきが小さい。

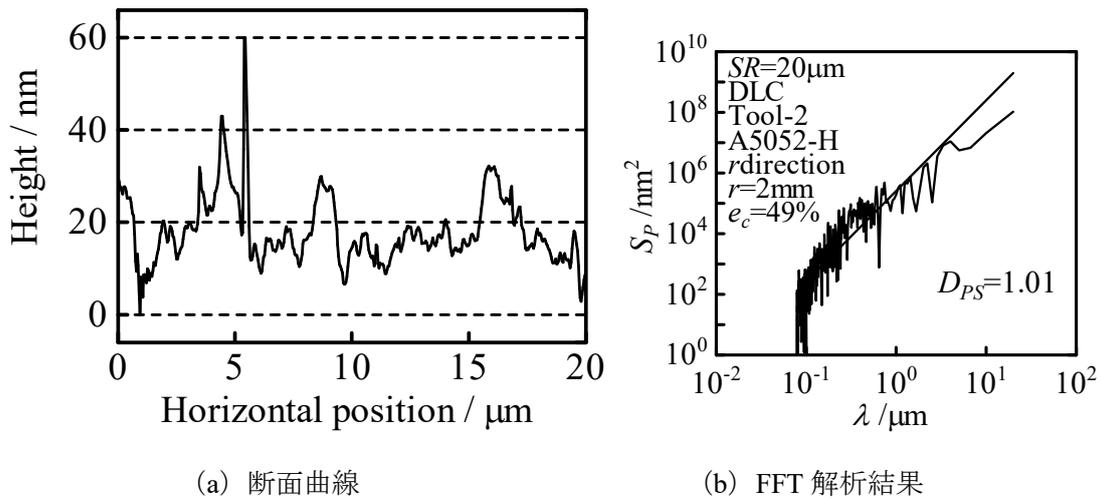


Fig.4.18 断面曲線および FFT 解析結果 (DLC, Tool-2, A5052-H, $r=2\text{mm}$, $e_c=49\%$)

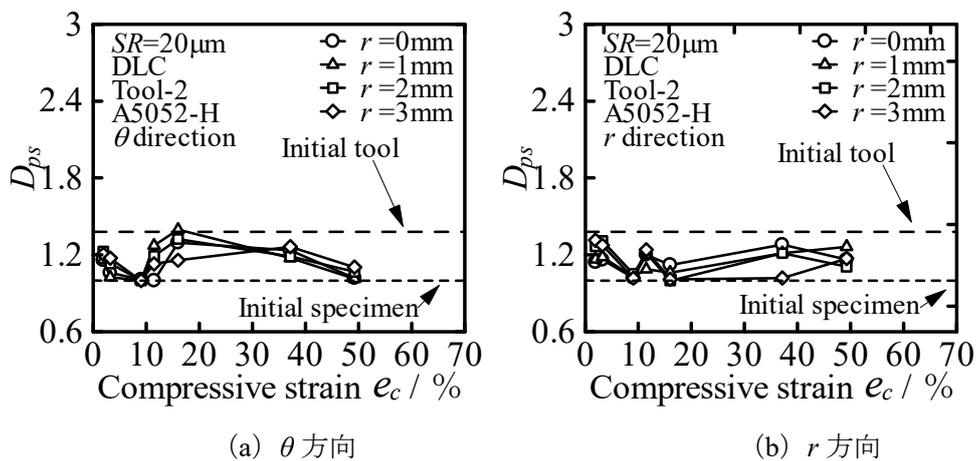


Fig.4.19 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H)

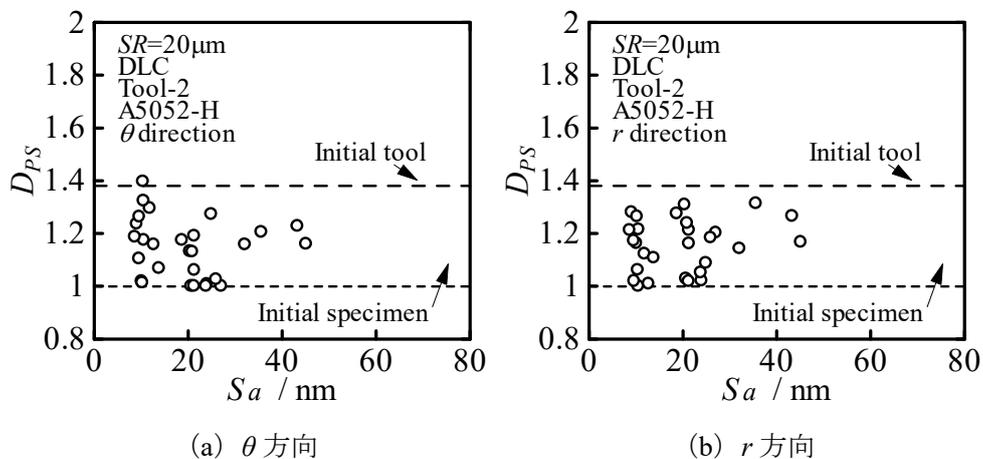


Fig.4.20 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, A5052-H)

4.6 DLC コーティング Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$), A5052-O における解析結果

4.6.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

零点集合法によって表面細部の凹凸形状について検討する. Fig.4.21 に解析の一例を示す. 周囲長 L_Z と面積 A_Z の関係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる. なお, 初期工具表面 (Tool-1) の零点集合次元 $D_Z=1.36$, 初期試験片表面の $D_Z=1.31$ である.

Fig.4.22 に零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す. 低圧縮率では D_Z は初期試験片の D_Z より小さく, 高圧縮率では初期工具の D_Z に近い値になることがわかる.

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

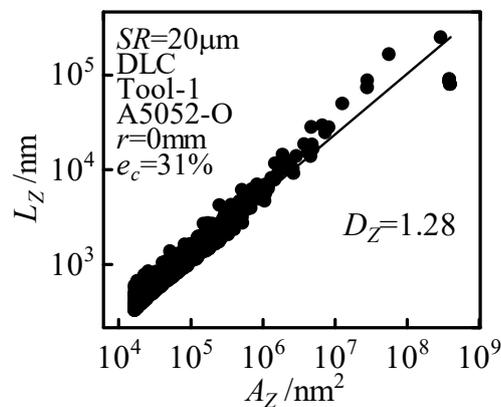


Fig.4.21 零点集合次元法による解析の一例 ($SR=20\mu\text{m}$, DLC, Tool-1, A5052-O, $e_c=31\%$)

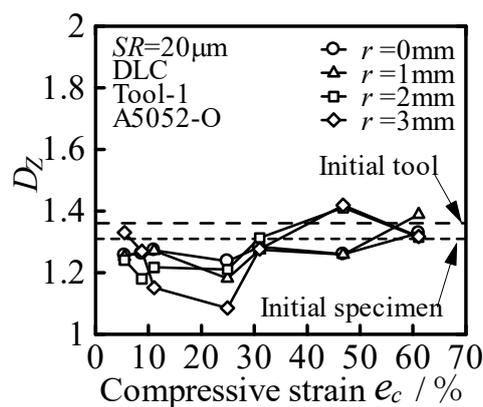


Fig.4.22 零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O)

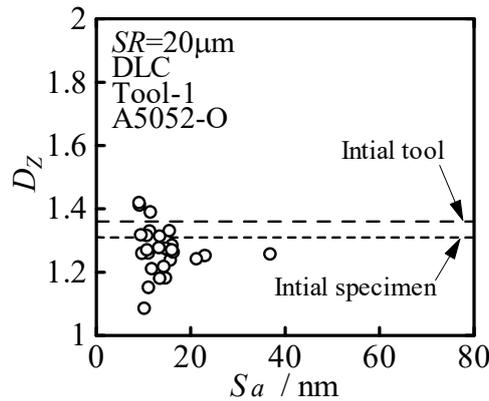


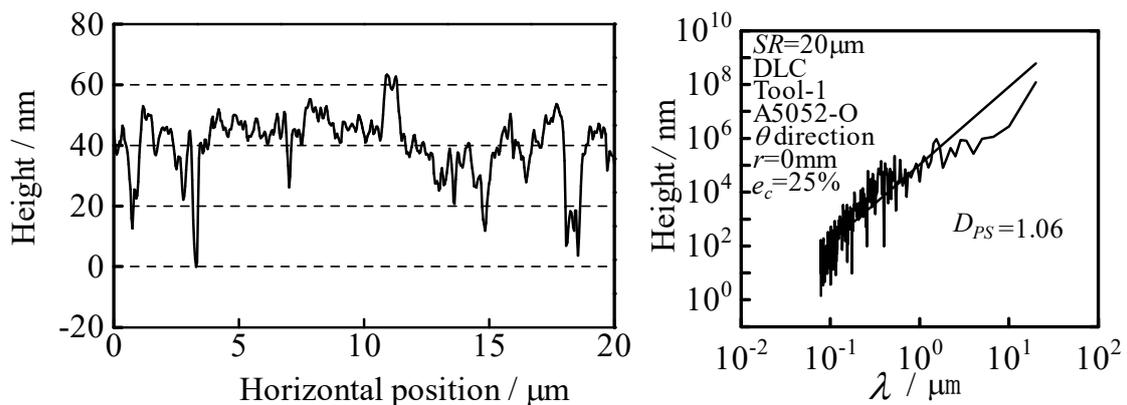
Fig.4.23 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O)

4.6.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

次に、パワースペクトル法によって表面細部の凹凸形状について検討する。Fig.4.24 に試験片表面の断面曲線と FFT 解析結果の一例を示す。パワースペクトル密度 S_p と波長 λ の関係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる。なお、初期工具表面 (Tool-1) のパワースペクトル次元 $D_{PS}=1.05$ 、初期試験片の $D_{PS}=1.13$ であった。

Fig.4.25 に θ 方向、 r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す。 θ 方向、 r 方向ともに圧縮率による D_{PS} のばらつきが大きい。 r 方向では θ 方向と比べて測定箇所による D_{PS} のばらつきが小さい。

Fig.4.26 に θ 方向、 r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。 θ 方向、 r 方向ともに S_a が小さいときに D_{PS} のばらつきが大きい、 θ 方向では、 r 方向と比べて D_{PS} のばらつきが小さい。いずれにしても S_a が小さいと D_{PS} が大きくなる傾向がある。



(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.4.24 断面曲線および FFT 解析結果 (DLC, Tool-1, A5052-O, $r=0\text{mm}$, $e_c=25\%$)

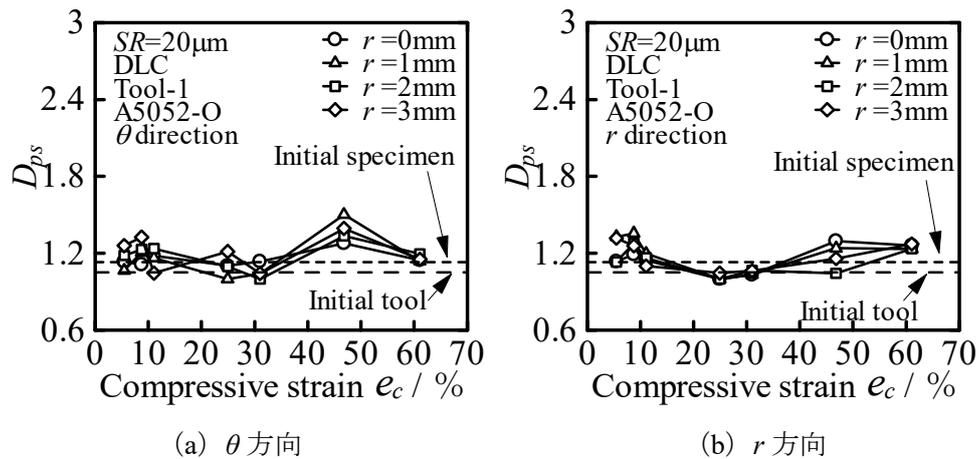


Fig.4.25 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O)

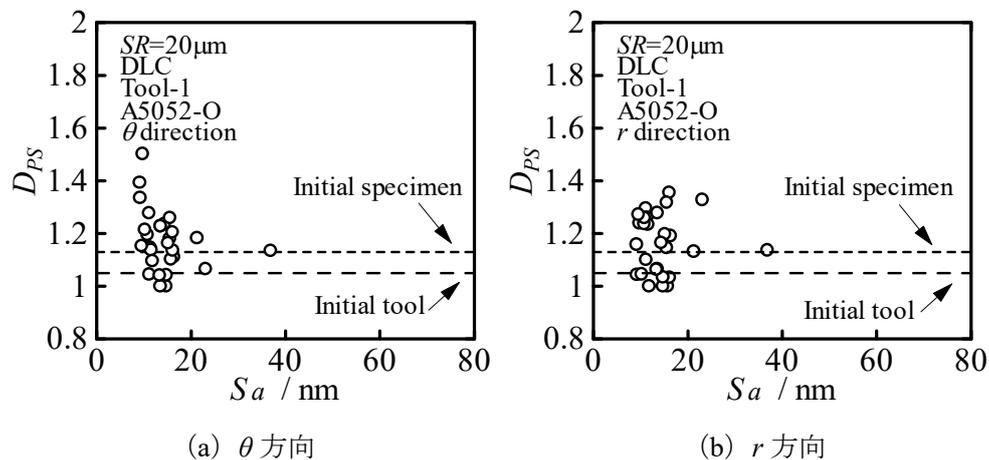


Fig.4.26 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-1, A5052-O)

4.7 DLC コーティング Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$), A5052-O における解析結果

4.7.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

零点集合法によって表面細部の凹凸形状について検討する. Fig.4.27 に解析の一例を示す. 周囲長 L_Z と面積 A_Z の関係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる. なお, 初期工具表面 (Tool-2) の零点集合次元 $D_Z=1.21$, 初期試験片表面の $D_Z=1.31$ である.

Fig.4.28 に零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す. 初期工具の D_Z と初期試験片の D_Z の間に収まっている.

Fig.4.29 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 によらず D_Z は 1.2-1.4 に近い値となっている.

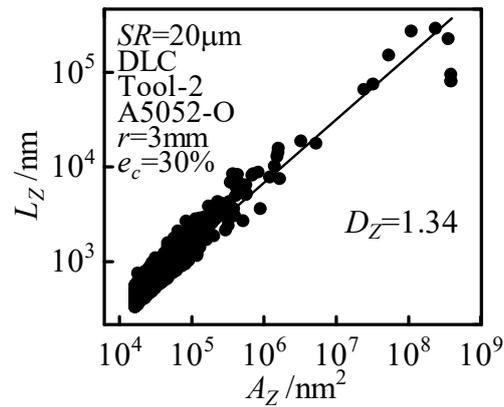


Fig.4.27 零点集合次元法による解析の一例 ($SR=20\mu\text{m}$, DLC, Tool-2, A5052-O, $e_c=30\%$)

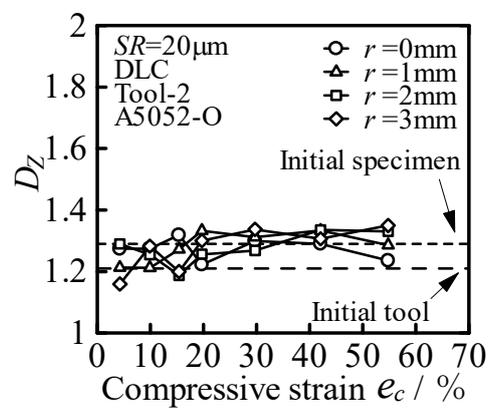


Fig.4.28 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A5052-O)

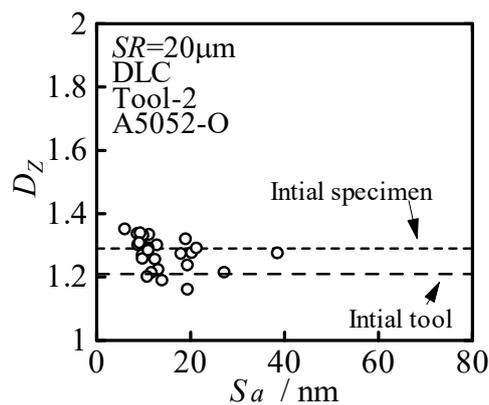


Fig.4.29 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, A5052-O)

4.7.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

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.4.30 に試験片表面の断面曲線と FFT 解析結果の一例を示す。パワースペクトル密度 S_p と波長 λ の関

係が直線性を持っていることからフラクタル性を持っていることがわかる。初期工具表面 (Tool-2) のパワースペクトル次元 $D_{PS}=1.41$ 、初期試験片表面の $D_{PS}=1.13$ であった。

Fig.4.31 に θ 方向, r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す。 θ 方向, r 方向ともに $e_c=20\%$ 以上では初期工具に近い D_{PS} の値になっている。

Fig.4.32 に θ 方向, r 方向におけるパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。 θ 方向, r 方向ともに, S_a が小さくなるほど D_{PS} が大きくなる傾向が見られる。

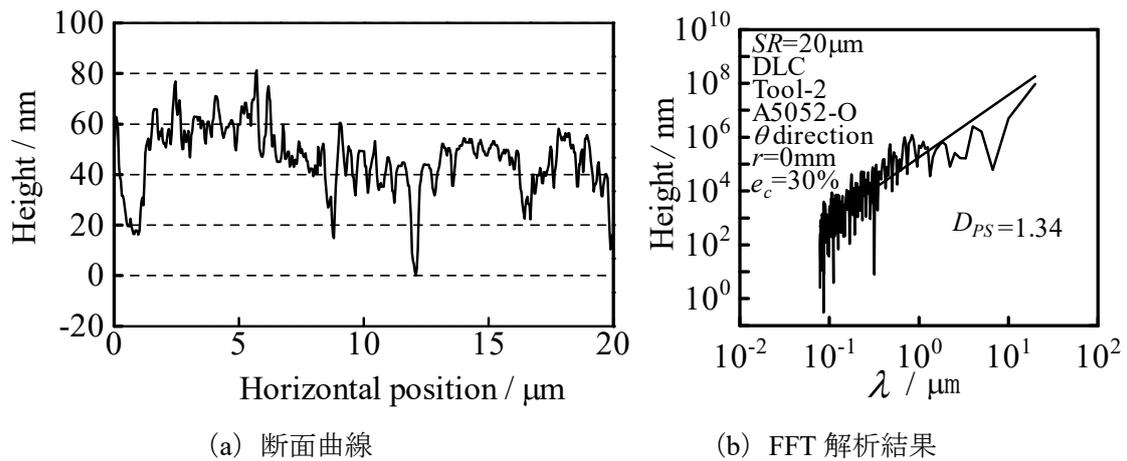


Fig.4.30 断面曲線および FFT 解析結果 (DLC, Tool-2, A5052-O, $r=0\text{mm}$, $e_c=30\%$)

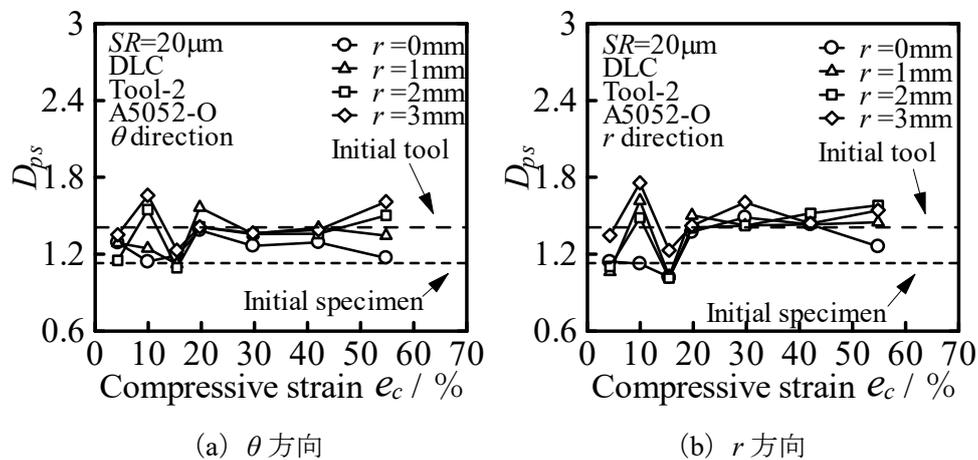


Fig.4.31 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, A5052-O)

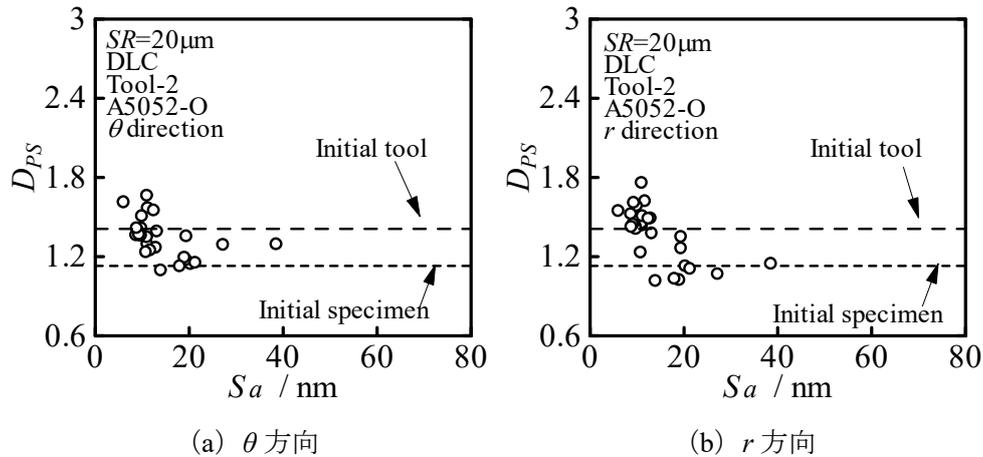


Fig.4.32 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, A5052-O)

4.8 工具表面粗さの影響

工具表面粗さの影響を調べるため、今回行った A5052-H と A5052-O における DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) の圧縮試験結果と DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) の圧縮試験結果の比較を行う。

4.8.1 A5052-H の結果

4.8.1.1 零点集合次元 D_z による加工品表面の解析結果

Fig.4.33 に A5052-H の零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの測定箇所においても工具表面粗さの影響は見られない。

Fig.4.34 に A5052-H 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。Tool-1 と Tool-2 で大きな差は見られない。

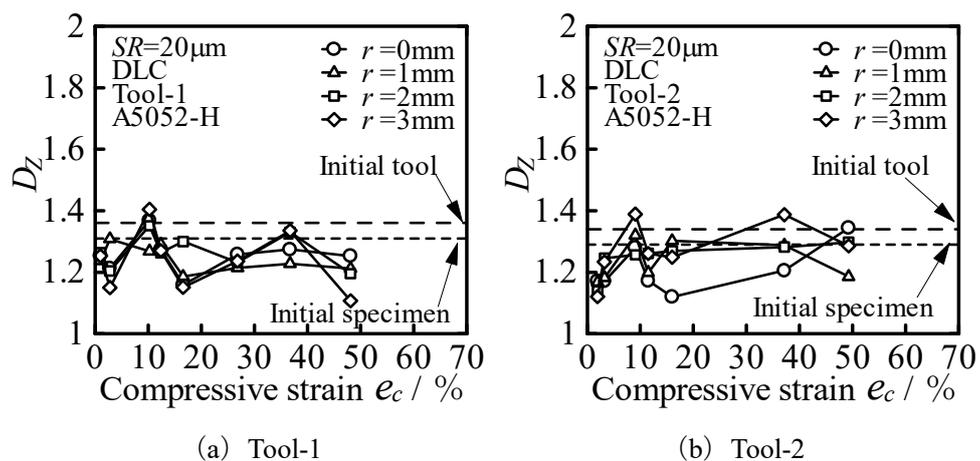


Fig.4.33 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, A5052-H)

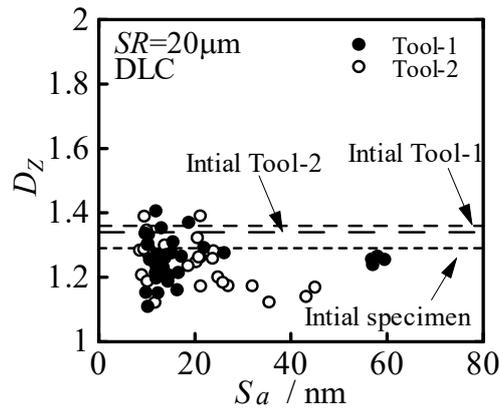


Fig.4.34 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, A5052-H)

4.8.1.2 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.4.35 に θ 方向, Fig.4.36 に r 方向における A5052-H の Tool-1 と Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに両者に大きな差は見られない.

Fig.4.37 に θ 方向, r 方向における A5052-H のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに Tool-1 では S_a が小さいと D_{PS} が大きくなる傾向が見られるが, Tool-2 ではその傾向は見られない.

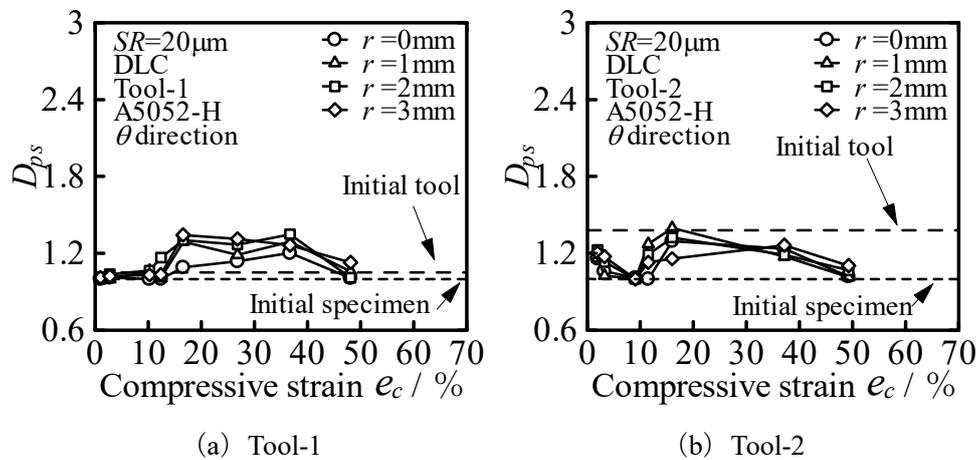


Fig.4.35 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, A5052-H, θ 方向)

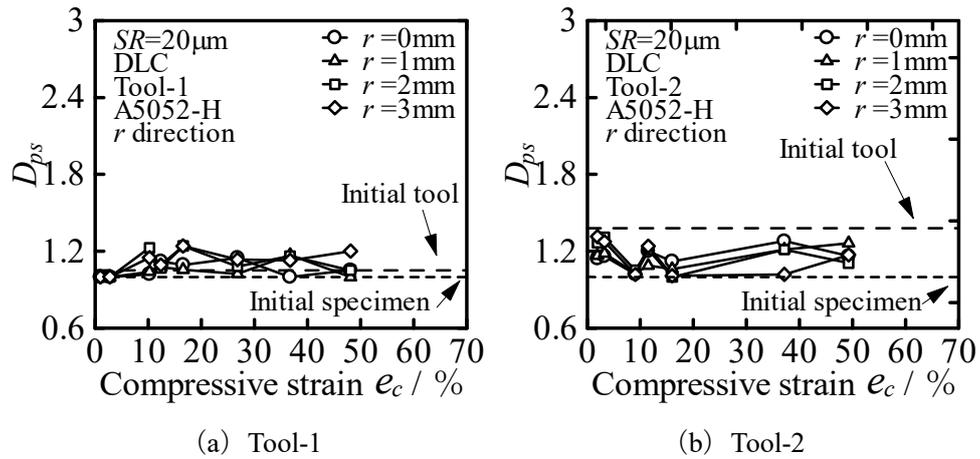


Fig.4.36 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, A5052-H, r 方向)

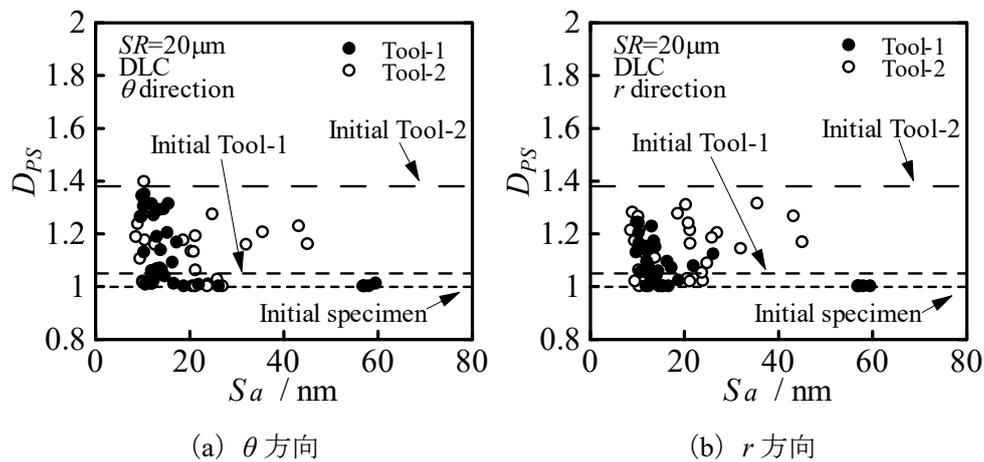


Fig.4.37 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, A5052-H)

4.8.2 A5052-O の結果

4.8.2.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

Fig.4.38 に A5052-O の零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す. Tool-2 の方が圧縮率による D_Z の変化が小さいことがわかる.

Fig.4.39 に A5052-O 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. Tool-1 と Tool-2 で大きな差は見られない.

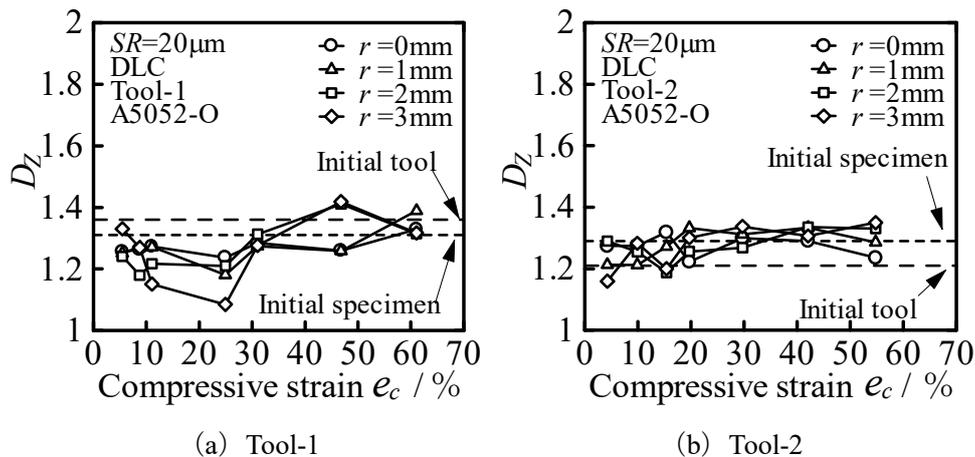


Fig.4.38 零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, A5052-O)

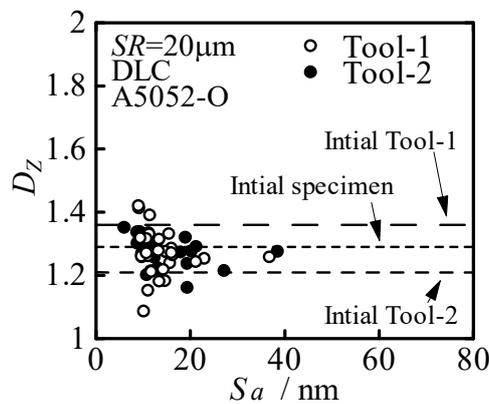


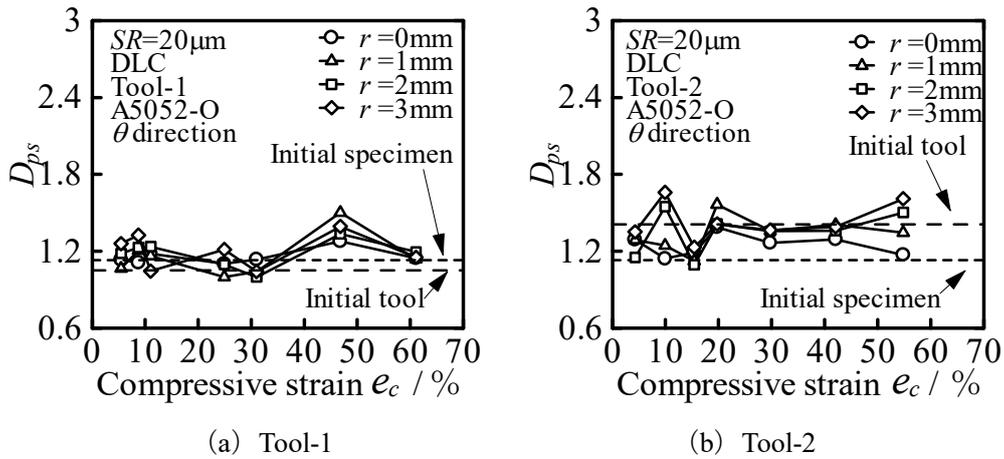
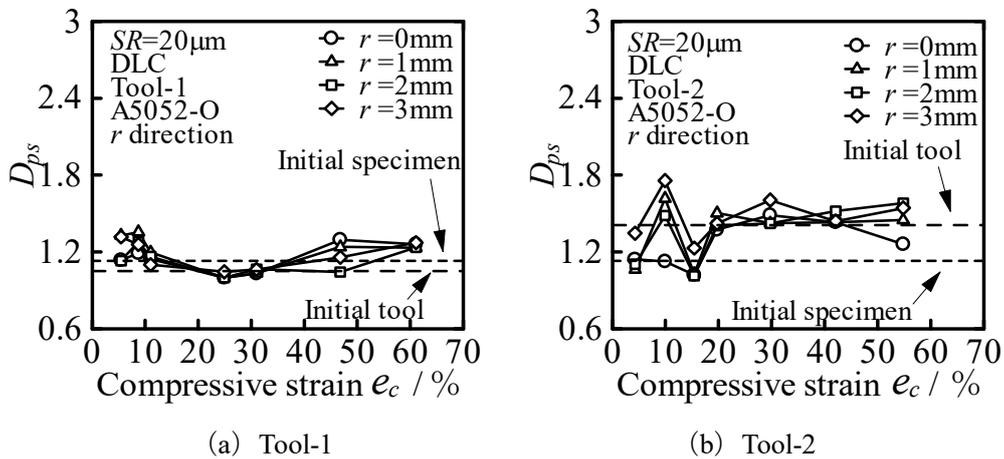
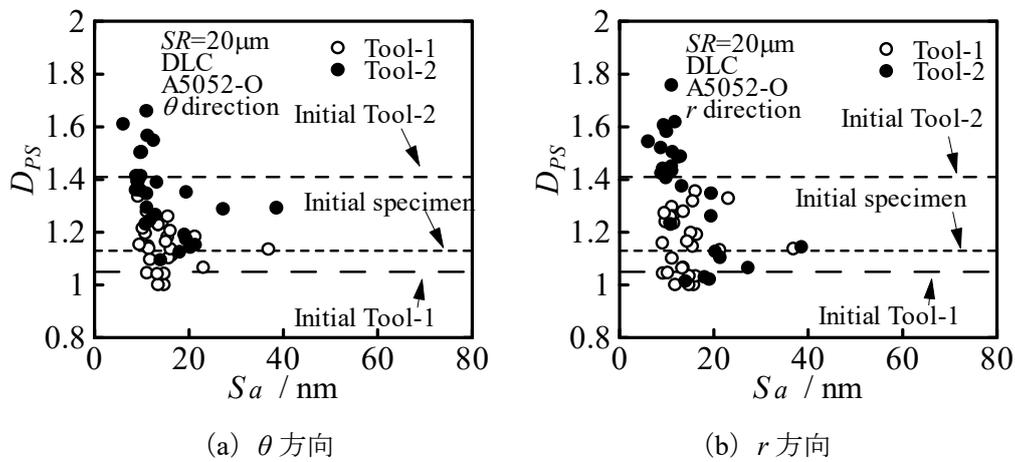
Fig.4.39 零点集合次元 D_Z と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, A5052-O)

4.8.2.2 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.4.40 に θ 方向, Fig.4.41 に r 方向における A5052-O の Tool-1 と Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. 工具表面粗さによる明確な違いは見られない.

Fig.4.42 に θ 方向, r 方向における A5052-O のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向, r 方向ともに Tool-2 では S_a が小さいと D_{PS} が大きくなる傾向が見られるが, Tool-1 ではその傾向は見られない.

零点集合次元 D_Z , パワースペクトル次元 D_{PS} ともに工具表面粗さの違いによる大きな違いは見られない.

Fig.4.40 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, A5052-O, θ 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 (DLC, A5052-O, r 方向)Fig.4.42 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 (DLC, A5052-O)

4.9 加工硬化の影響

加工硬化の違いによる平滑化の挙動を調べるため、DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った A5052-O の圧縮試験結果と A5052-H の圧縮試験結果の比較、DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った A5052-O の圧縮試験結果と A5052-H の圧縮試験結果の比較を行う。

4.9.1 零点集合次元 D_z による加工品表面の解析結果

Fig.4.43 に Tool-1 の零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの箇所のおよびの圧縮率においても D_z に大きな差はないことがわかる。

Fig.4.44 に Tool-2 の零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの箇所のおよびの圧縮率においても D_z に大きな差はないが A5052-H の方が測定箇所によるばらつきが大きいことがわかる。

Fig.4.45 に各条件の零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。いずれの箇所のおよびの圧縮率においても D_z に大きな差はないことがわかる。

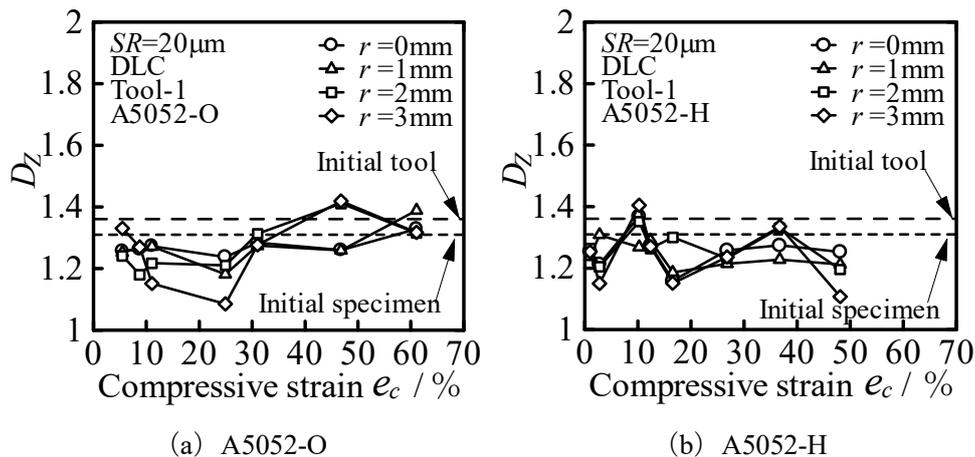
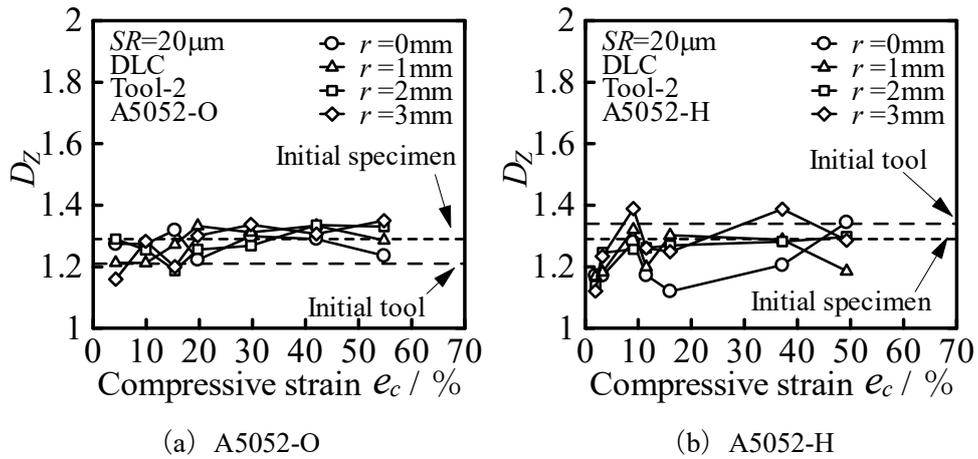
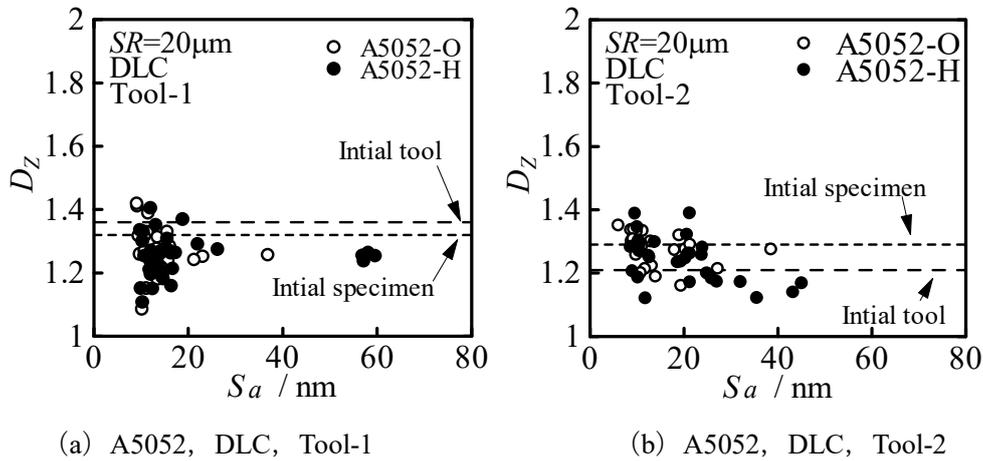


Fig.4.43 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (A5052, DLC, Tool-1)

Fig.4.44 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (A5052, DLC, Tool-2)Fig.4.45 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係

4.9.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

Fig.4.46 に θ 方向, Fig.4.47 に r 方向における Tool-1 のパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの方向においても低圧縮率では A5052-O の方が D_{PS} が大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.48 に θ 方向, Fig.4.49 に r 方向における Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの方向においても両者に大きな差は見られない.

Fig.4.50 に θ 方向, r 方向における Tool-1 のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. いずれの方向においても両者に大きな差は見られない.

Fig.4.51 に θ 方向, r 方向における Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. いずれの方向においても A5052-O の方が D_{PS} が大きくなる傾向が見られる.

加工硬化の影響について, 零点集合次元 D_z , パワースペクトル次元 D_{PS} ともに加工硬化

による大きな差は見られない。

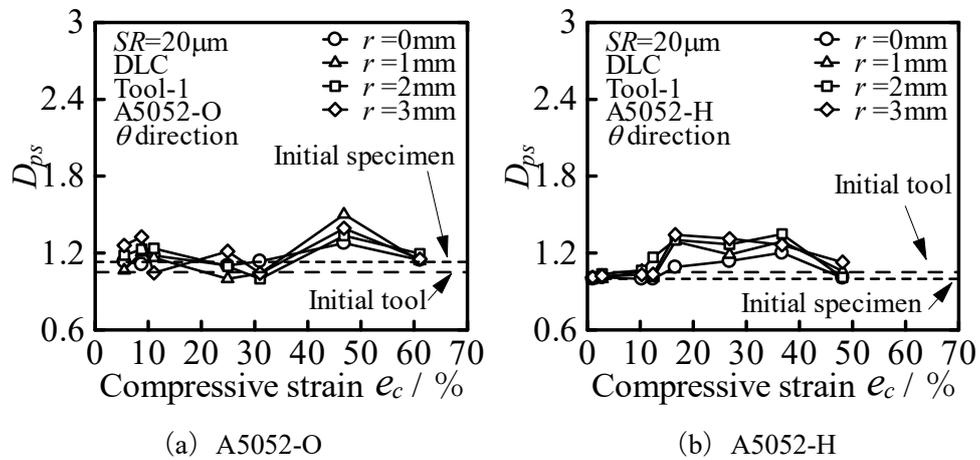


Fig.4.46 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (A5052, DLC, Tool-1, θ 方向)

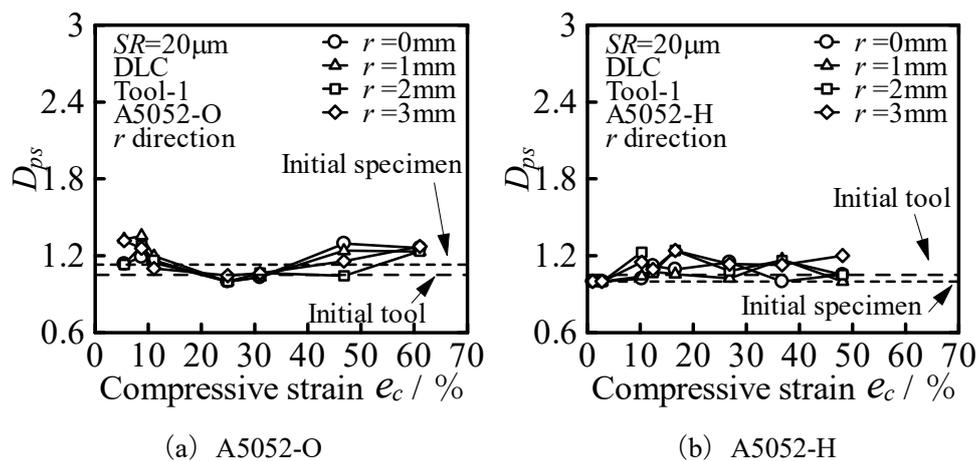
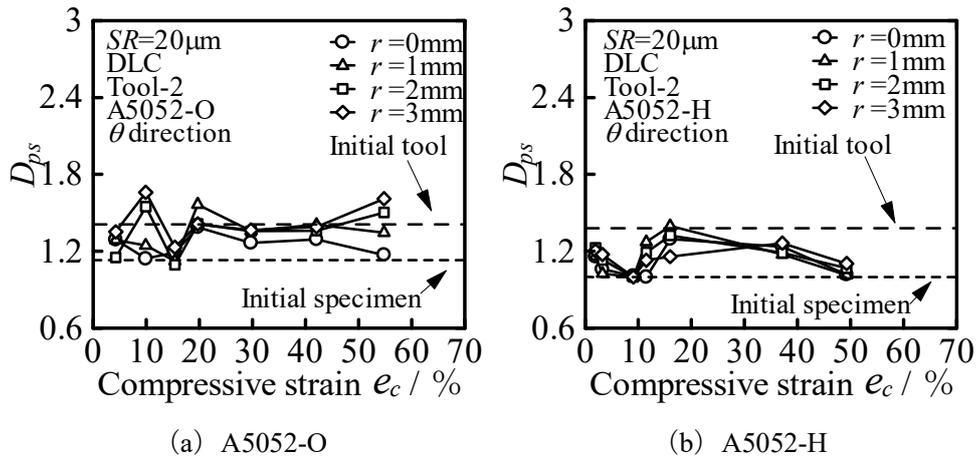
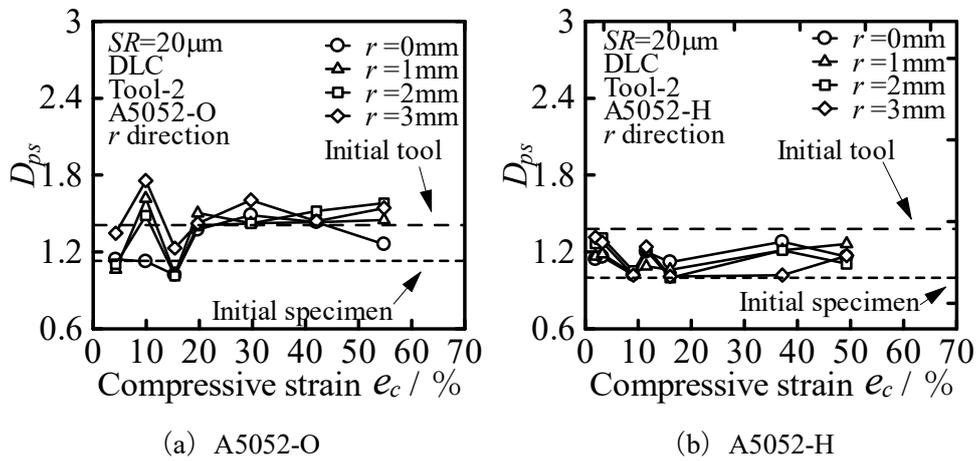
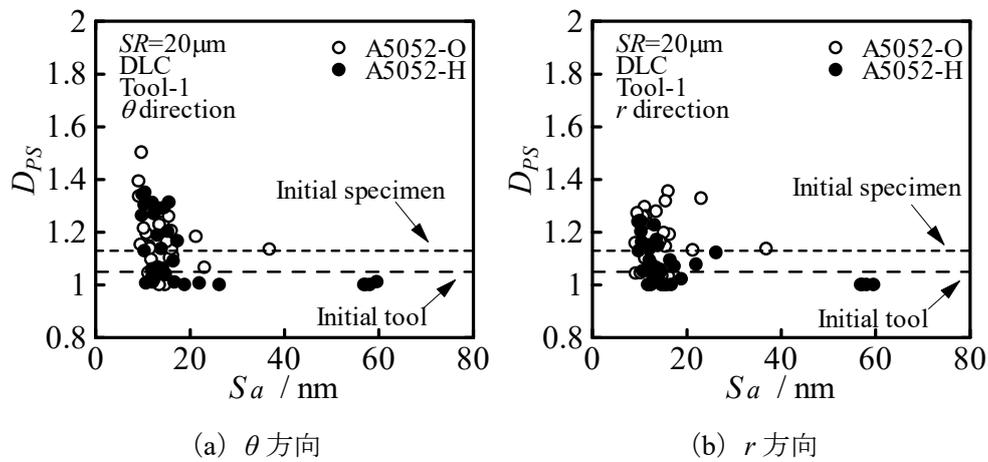


Fig.4.47 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (A5052, DLC, Tool-1, r 方向)

Fig.4.48 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (A5052, DLC, Tool-2, θ 方向)Fig.4.49 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (A5052, DLC, Tool-2, r 方向)Fig.4.50 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 (A5052, DLC, Tool-1)

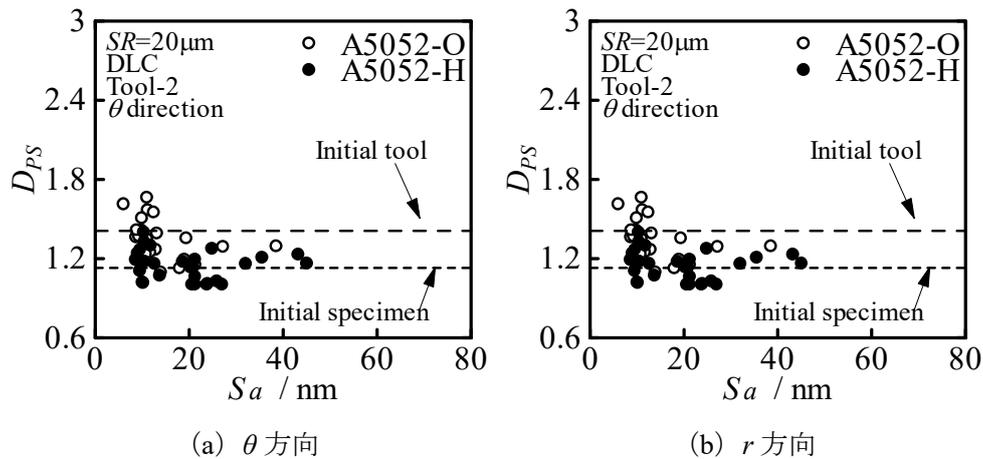


Fig.4.51 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (A5052, DLC, Tool-2)

4.10 材料の影響

4.10.1 A5052-H と A1050-H の比較

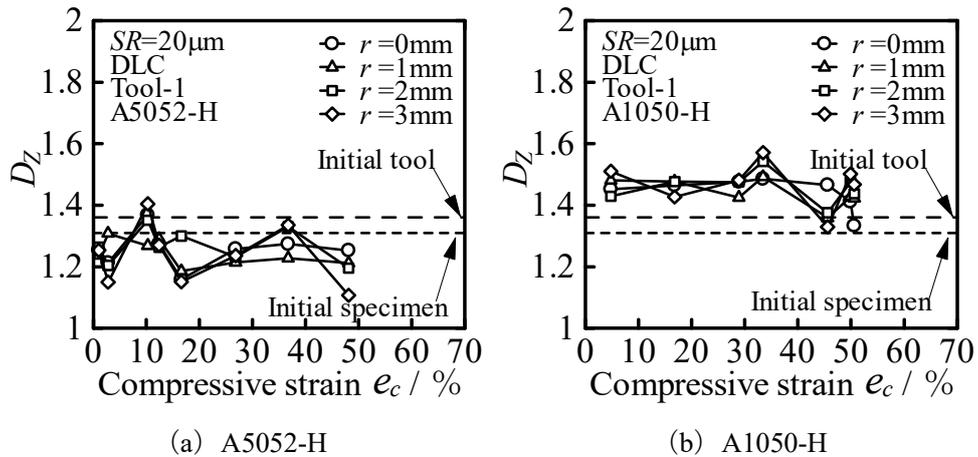
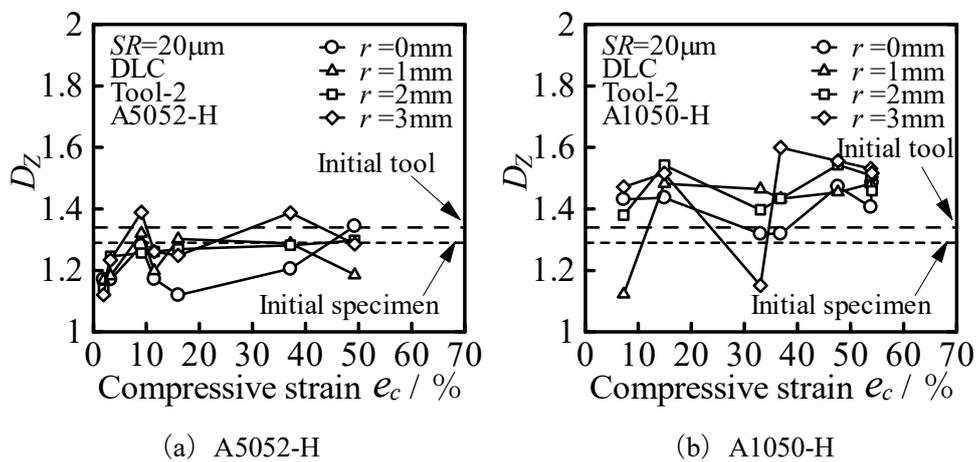
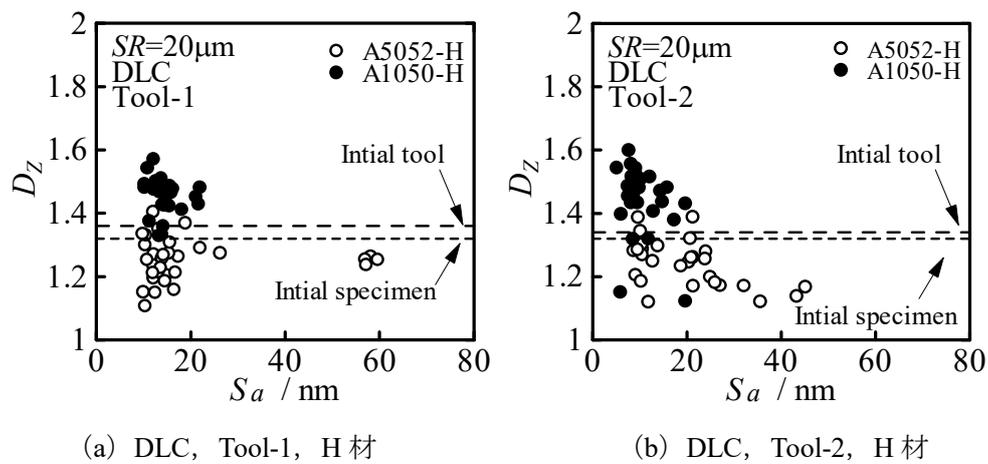
材料の違いによる平滑化の挙動を調べるため、DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った A5052-H の圧縮試験結果と過去に行った A1050-H の圧縮試験結果⁽¹⁸⁾の比較、DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った A5052-H の圧縮試験結果と過去に行った A1050-H の圧縮試験結果⁽¹⁸⁾の比較を行う。

4.10.1.1 零点集合次元 D_z による加工品表面の解析結果

Fig.4.52 に Tool-1 の零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの箇所、いずれの圧縮率においても A1050-H の方が D_z が大きくなっていることがわかる。

Fig.4.53 に Tool-2 の零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係を示す。ほとんどすべての圧縮率において A1050-H の方が D_z が大きくなっていることがわかる。

Fig.4.54 に各条件の零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。Tool-1 と Tool-2 ではともに A1050-H の方が D_z が大きくなっていることがわかる。

Fig.4.52 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, H材)Fig.4.53 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, H材)Fig.4.54 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係

4.10.1.2 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.4.55 に θ 方向, Fig.4.56 に r 方向における Tool-1 のパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向では両者に大きな差は見られないが, r 方向では測定個所によらずいずれの圧縮率においても A1050-H の方が D_{PS} が大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.57 に θ 方向, Fig.4.58 に r 方向における Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向では両者に大きな差は見られないが, r 方向では測定個所によらずいずれの圧縮率においても A1050-H の方が D_{PS} が大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.59 に θ 方向, r 方向における Tool-1 のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向では大きな差は見られないが, r 方向では A1050-H の方が D_{PS} のばらつきは大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.60 に θ 方向, r 方向における Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. いずれの方向でも大きな差は見られない.

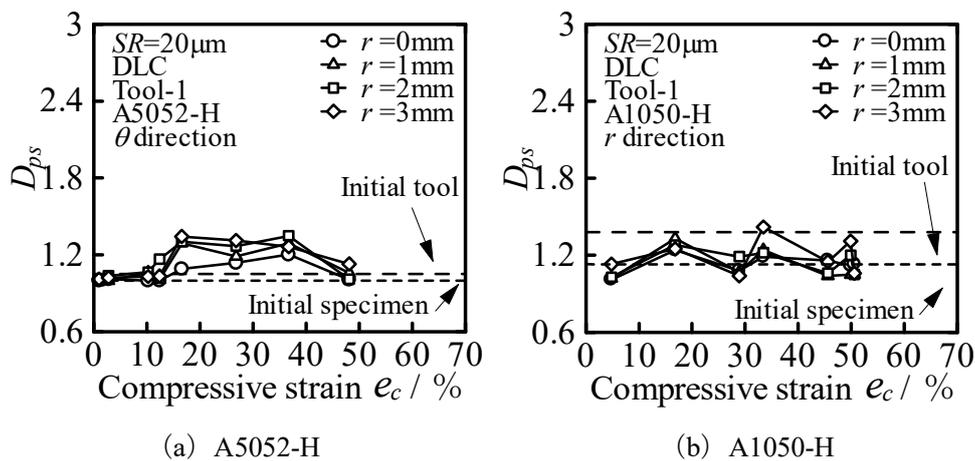


Fig.4.55 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, H材, θ 方向)

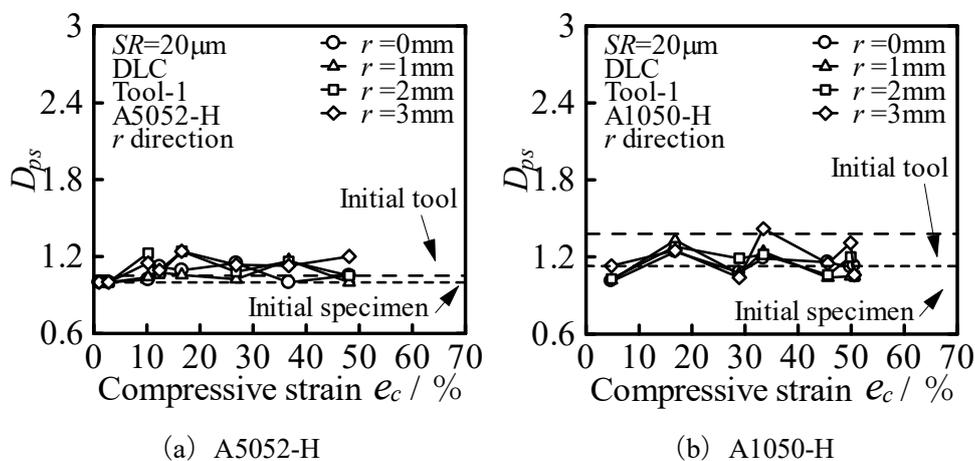
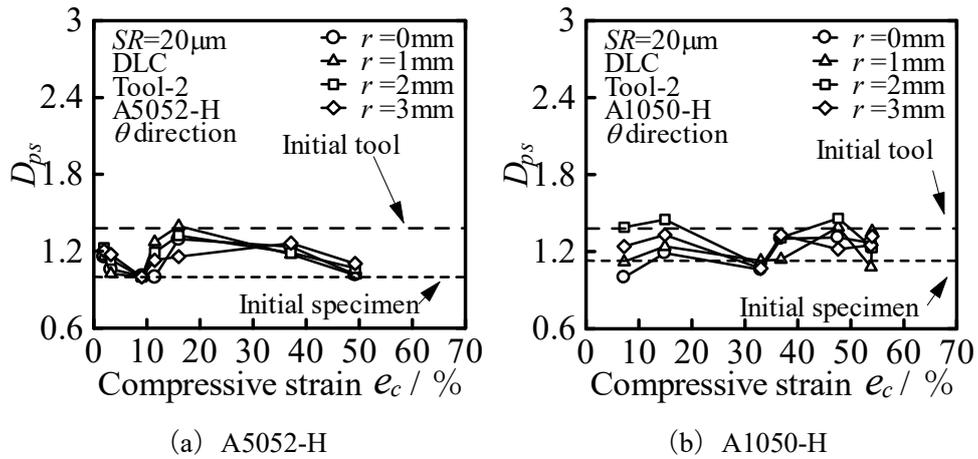
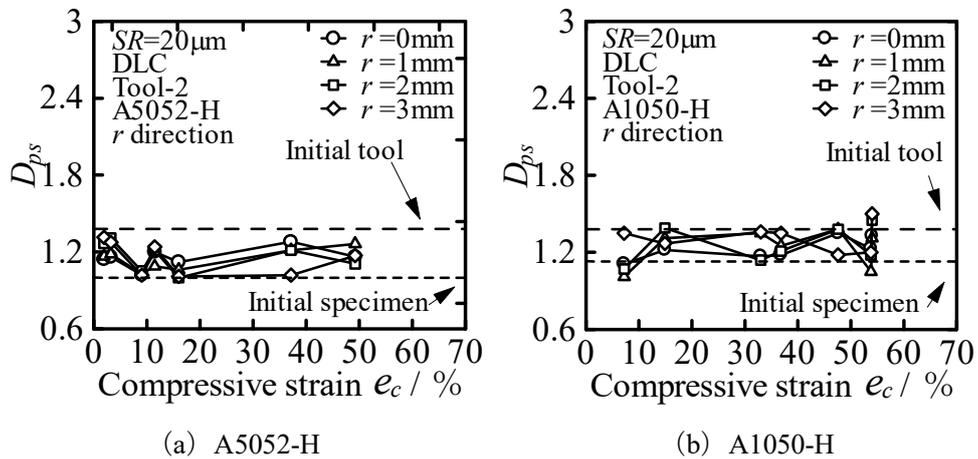
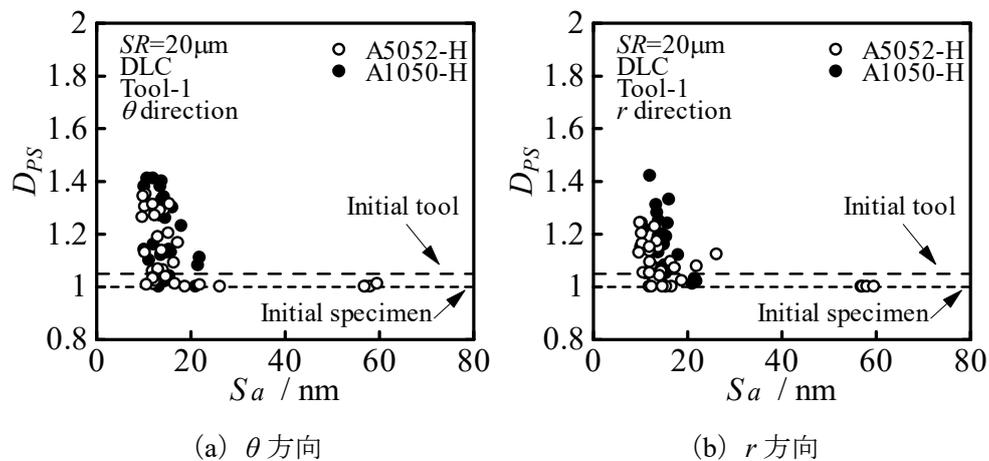


Fig.4.56 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, H材, r 方向)

Fig.4.57 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, H材, θ 方向)Fig.4.58 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, H材, r 方向)Fig.4.59 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-1, H材)

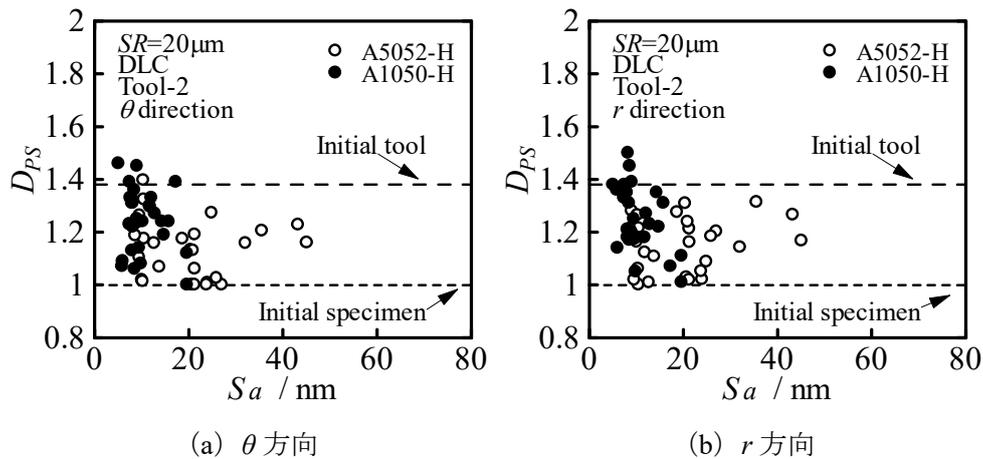


Fig.4.60 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, H材)

4.10.2 A5052-H と C1020-H の比較

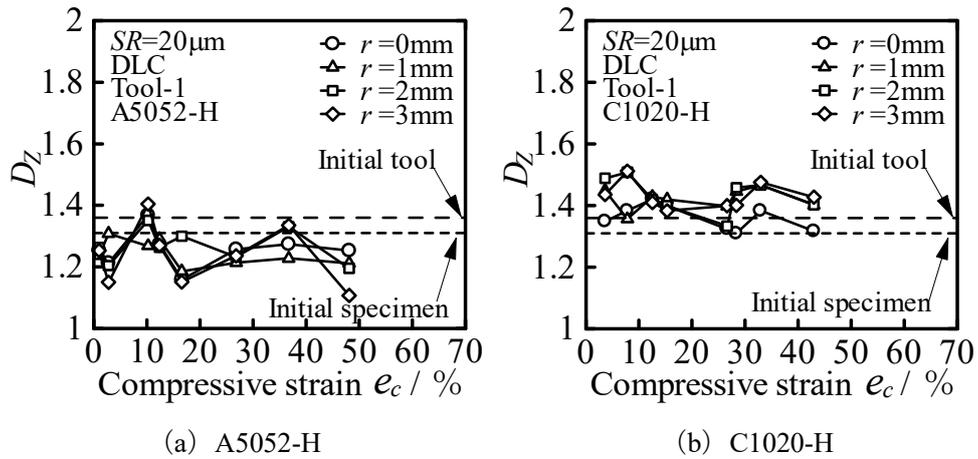
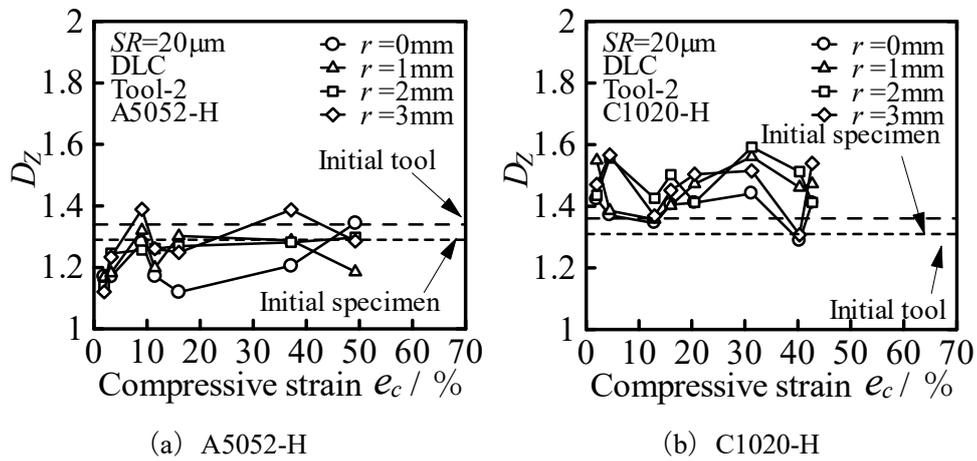
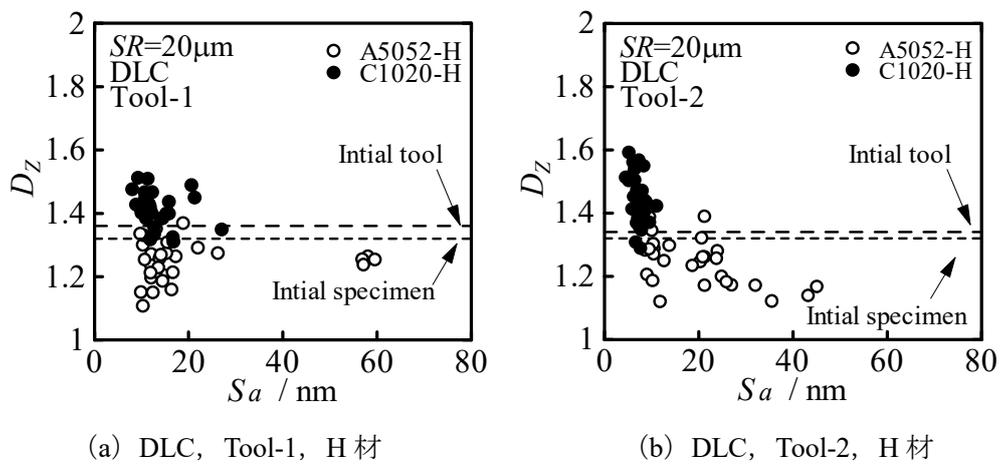
材料の違いによる平滑化の挙動を調べるため、DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った A5052-H の圧縮試験結果と過去に行った C1020-H の圧縮試験結果⁽²¹⁾の比較, DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った A5052-H の圧縮試験結果と過去に行った C1020-H の圧縮試験結果⁽²¹⁾の比較を行う。

4.10.2.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

Fig.4.61 に Tool-1 の零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。A5052-H の方が D_Z が小さい傾向が見られる。

Fig.4.62 に Tool-2 の零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。A5052-H の方が D_Z が小さい傾向が見られる。

Fig.4.63 に各条件の零点集合次元 D_Z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。Tool-1 と Tool-2 ともに A5052-H の方が D_Z が小さい傾向が見られる。

Fig.4.61 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, H材)Fig.4.62 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, H材)Fig.4.63 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係

4.10.2.2 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.4.64 に θ 方向, Fig.4.65 に r 方向における Tool-1 のパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向では両者に大きな差は見られないが, r 方向では測定個所によらずいずれの圧縮率においても C1020-H の方が D_{PS} が大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.66 に θ 方向, Fig.4.67 に r 方向における Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向では両者に大きな差は見られないが, r 方向では測定個所によらずいずれの圧縮率においても C1020-H の方が D_{PS} が大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.68 に θ 方向, r 方向における Tool-1 のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向では大きな差は見られないが, r 方向では C1020-H の方が D_{PS} のばらつきは大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.69 に θ 方向, r 方向における Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向では大きな差は見られないが, r 方向では C1020-H の方が D_{PS} のばらつきは大きくなる傾向が見られる.

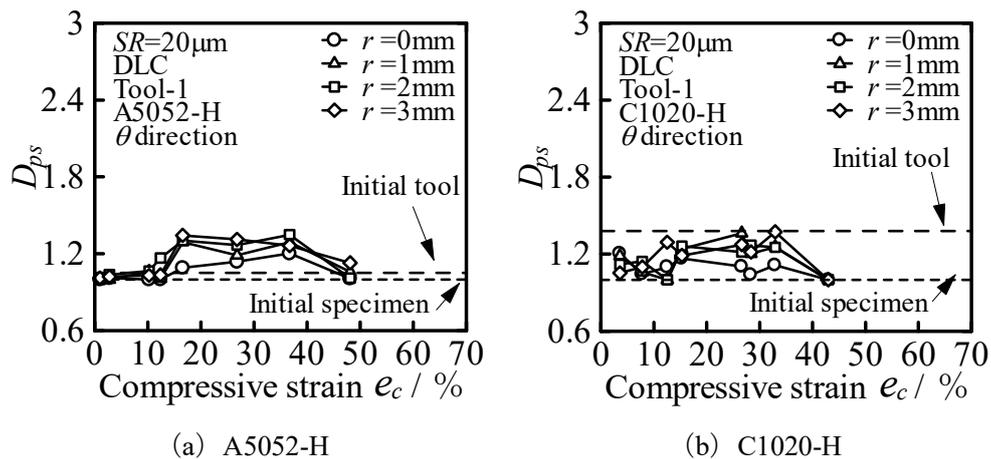
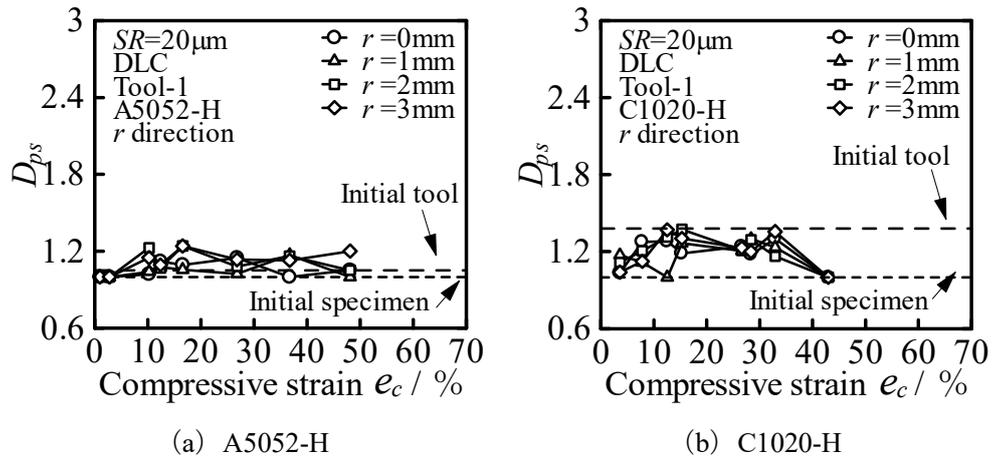
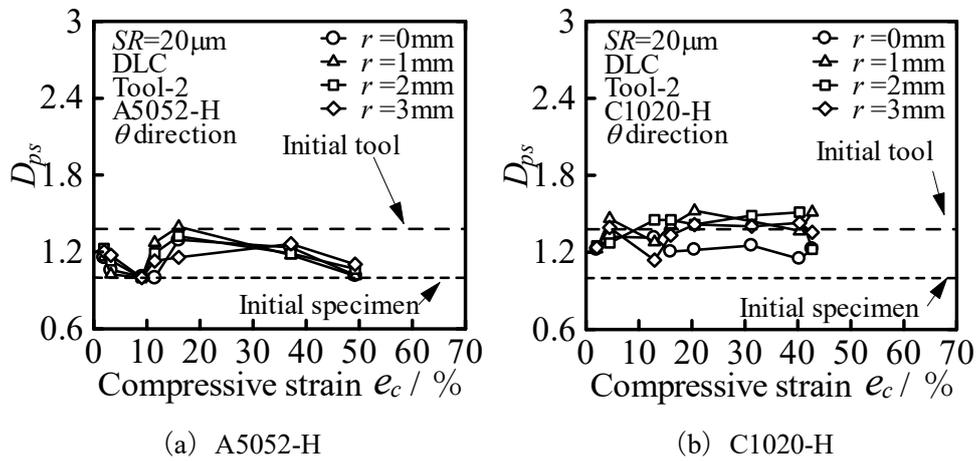
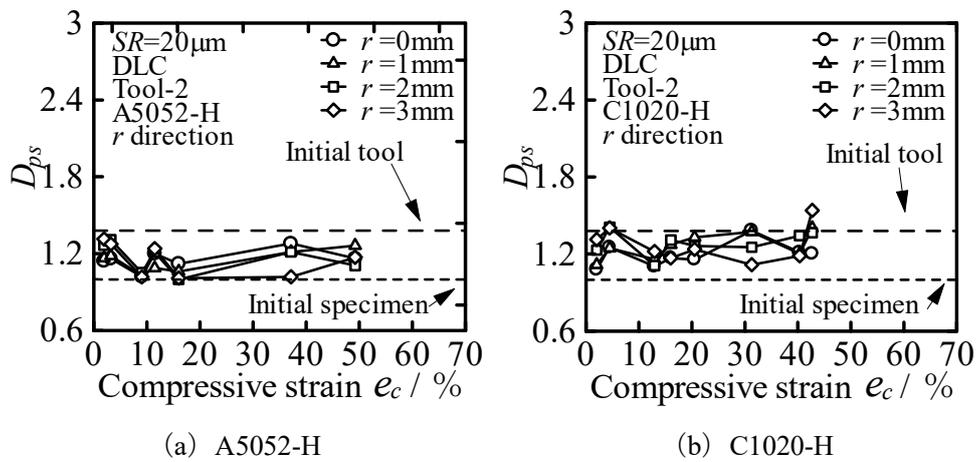


Fig.4.64 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, H材, θ 方向)

Fig.4.65 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, H材, r 方向)Fig.4.66 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, H材, θ 方向)Fig.4.67 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, H材, r 方向)

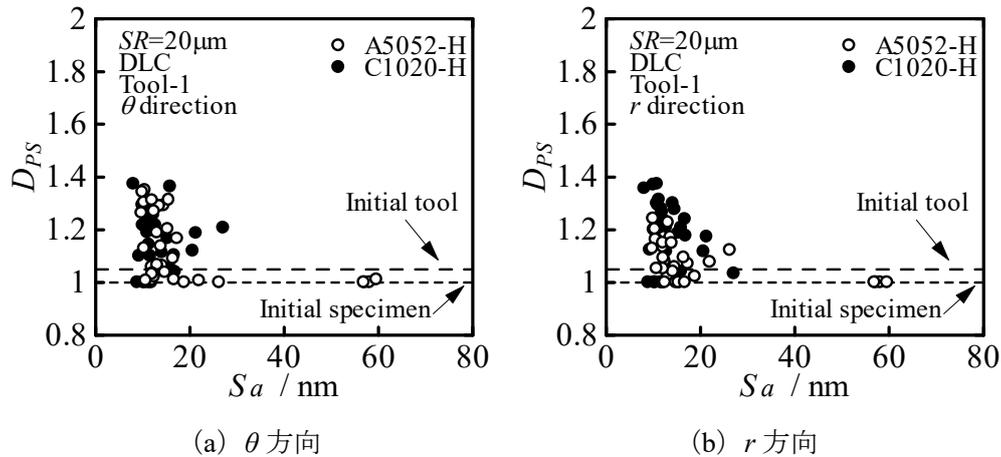


Fig.4.68 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-1, H 材)

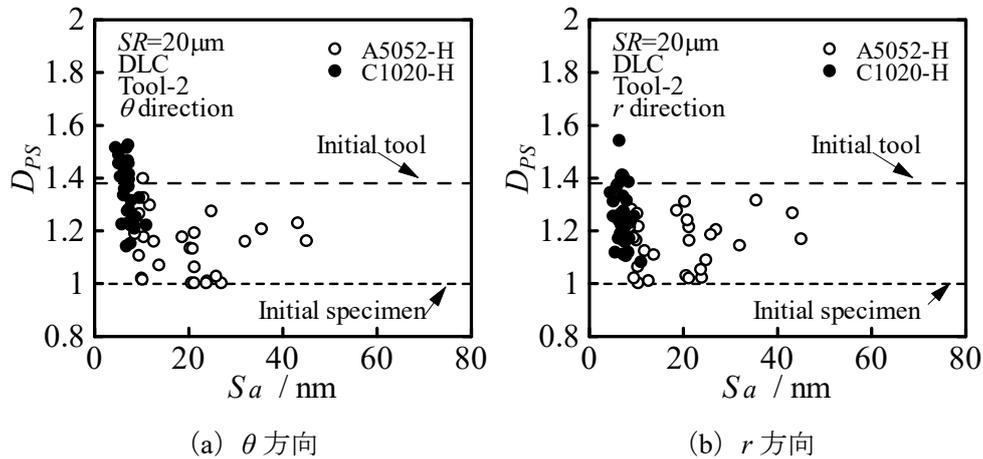


Fig.4.69 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, H 材)

4.10.3 A5052-O と A1050-O の比較

材料の違いによる平滑化の挙動を調べるため、DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った A5052-O の圧縮試験結果と過去に行った A1050-O の圧縮試験結果⁽¹⁸⁾の比較、DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った A5052-O の圧縮試験結果と過去に行った A1050-O の圧縮試験結果⁽¹⁸⁾の比較を行う。

4.10.3.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

Fig.4.70 に Tool-1 の零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。いずれの箇所のいずれの圧縮率においても A1050-O の方が D_Z が大きくなっていることがわかる。

Fig.4.71 に Tool-2 の零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。A1050-O の方が測定箇所による D_Z のばらつきが大きくなっていることがわかる。

Fig.4.72 に各条件の零点集合次元 D_Z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。Tool-1 では A1050-

Oの方が D_z が大きくなっていることがわかる。

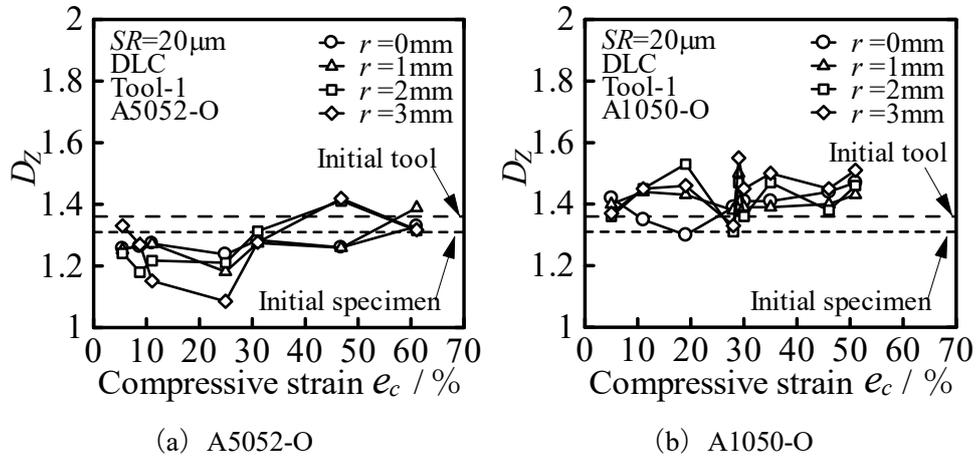


Fig.4.70 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, O材)

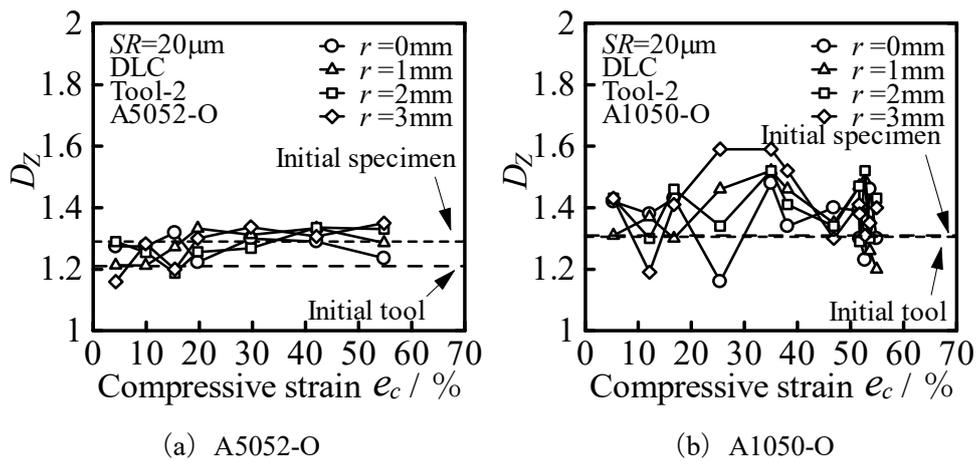
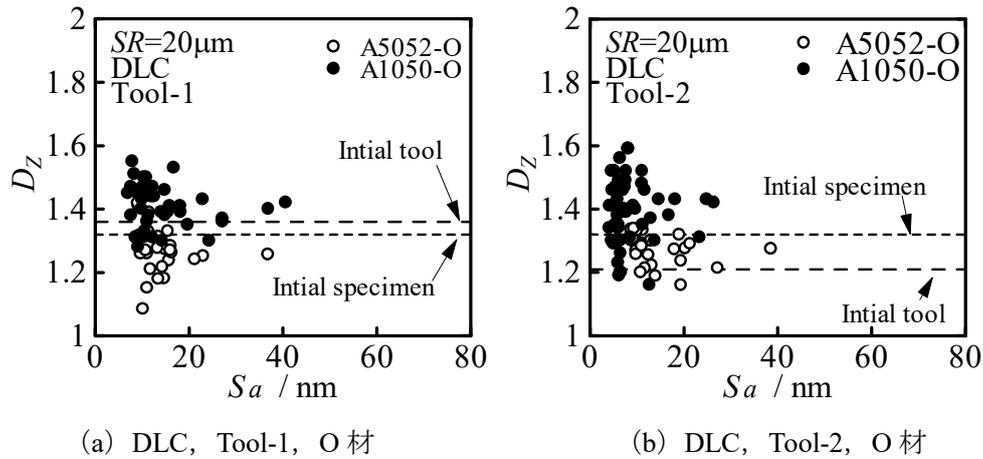


Fig.4.71 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, O材)

Fig.4.72 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係

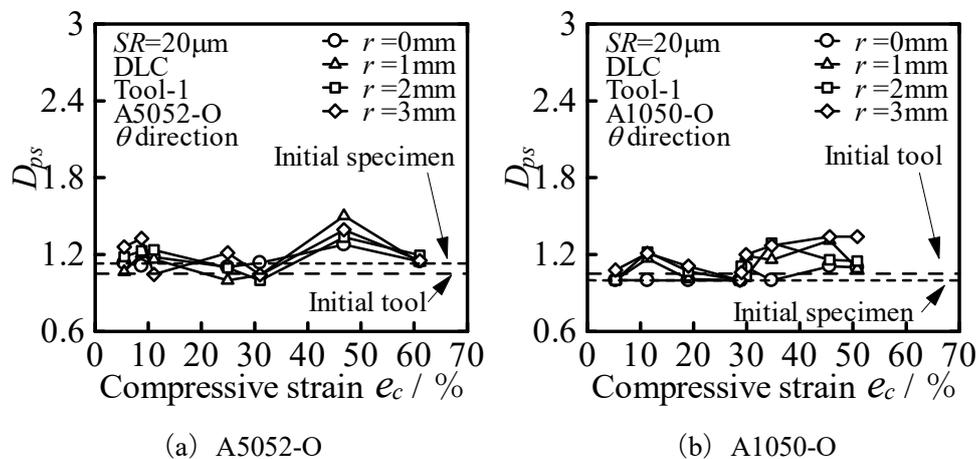
4.10.3.2 パワースペクトル次元 D_{PS} による加工品表面の解析結果

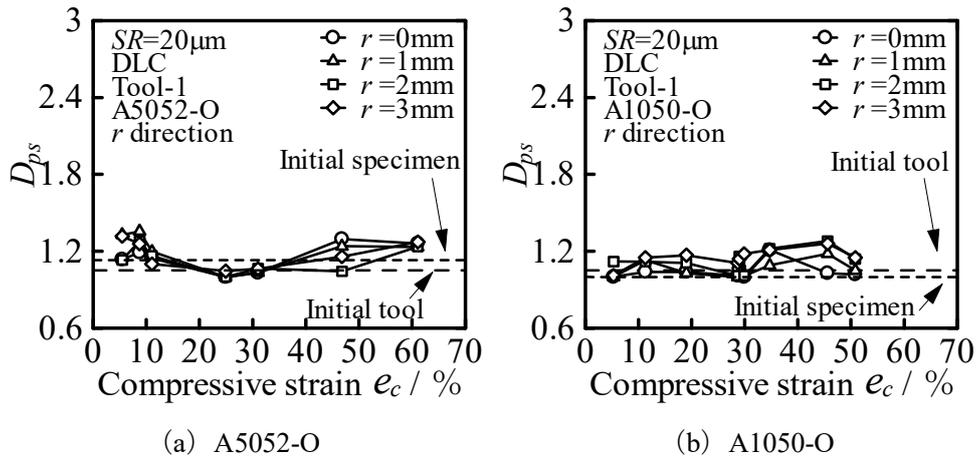
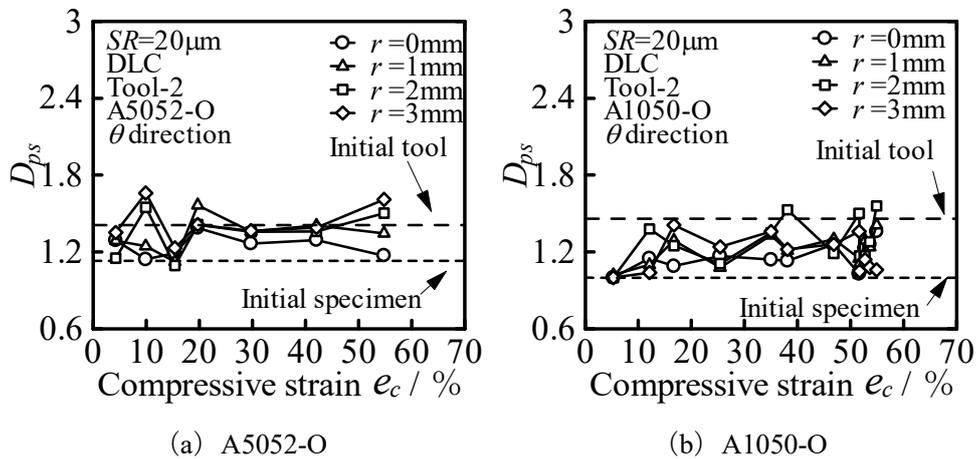
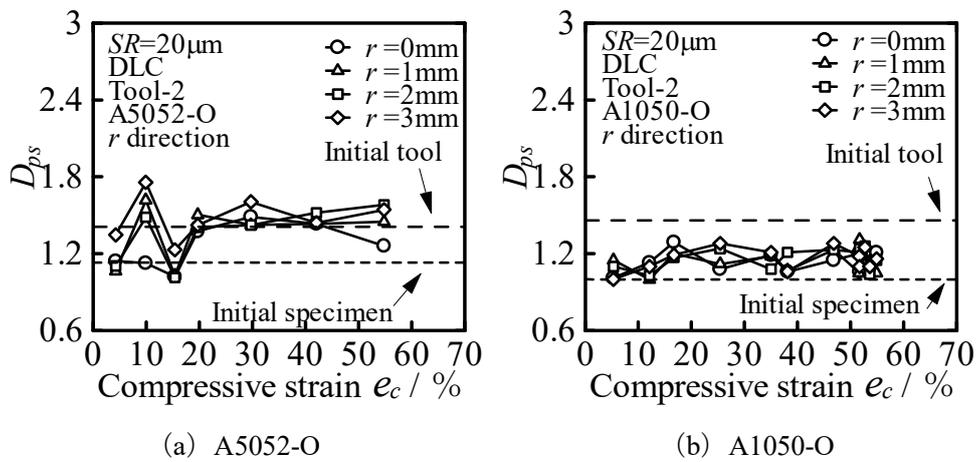
Fig.4.73 に θ 方向, Fig.4.74 に r 方向における Tool-1 のパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. いずれの方向においても両者に大きな差は見られない.

Fig.4.75 に θ 方向, Fig.4.76 に r 方向における Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向では両者に大きな差は見られないが, r 方向ではほとんどの圧縮率において A5052-O の方が D_{PS} が大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.77 に θ 方向, r 方向における Tool-1 のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. r 方向では大きな差は見られないが, θ 方向では A5052-O の方が D_{PS} のばらつきは大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.78 に θ 方向, r 方向における Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. θ 方向では大きな差は見られないが, r 方向では A5052-O の方が D_{PS} のばらつきは大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.73 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, O材, θ 方向)

Fig.4.74 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, O材, r 方向)Fig.4.75 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, O材, θ 方向)Fig.4.76 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, O材, r 方向)

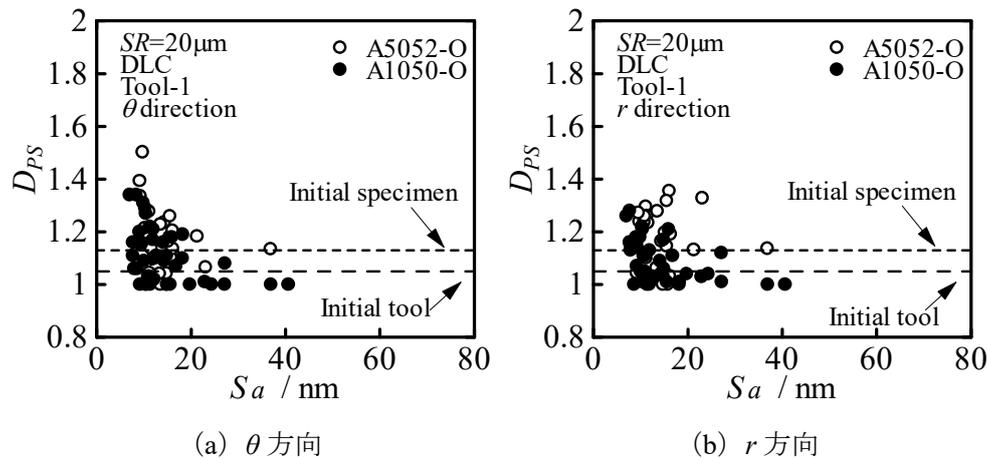


Fig.4.77 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-1, O 材)

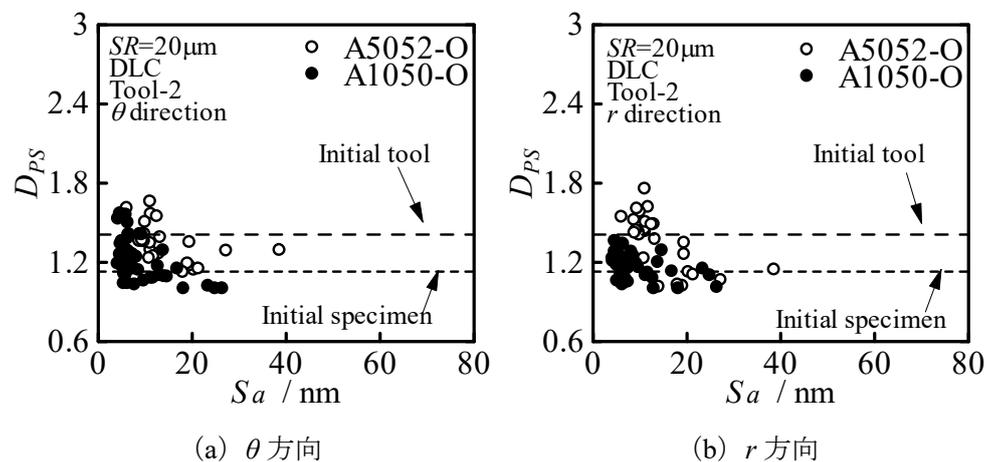


Fig.4.78 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, O 材)

4.10.4 A5052-O と C1020-O の比較

材料の違いによる平滑化の挙動を調べるため、DLC コーティング工具 Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$) における今回行った A5052-O の圧縮試験結果と過去に行った C1020-O の圧縮試験結果⁽²¹⁾の比較、DLC コーティング工具 Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) における今回行った A5052-O の圧縮試験結果と過去に行った C1020-O の圧縮試験結果⁽²²⁾の比較を行う。

4.10.4.1 零点集合次元 D_Z による加工品表面の解析結果

Fig.4.79 に Tool-1 の零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。A5052-O の方が D_Z が小さい傾向が見られる。

Fig.4.80 に Tool-2 の零点集合次元 D_Z と圧縮率 e_c の関係を示す。C1020-O の方が測定箇所による D_Z のばらつきが大きい傾向が見られる。

Fig.4.81 に各条件の零点集合次元 D_Z と算術平均面粗さ S_a の関係を示す。Tool-1 と Tool-2

ともに A5052-O の方が D_z が小さい傾向が見られる。

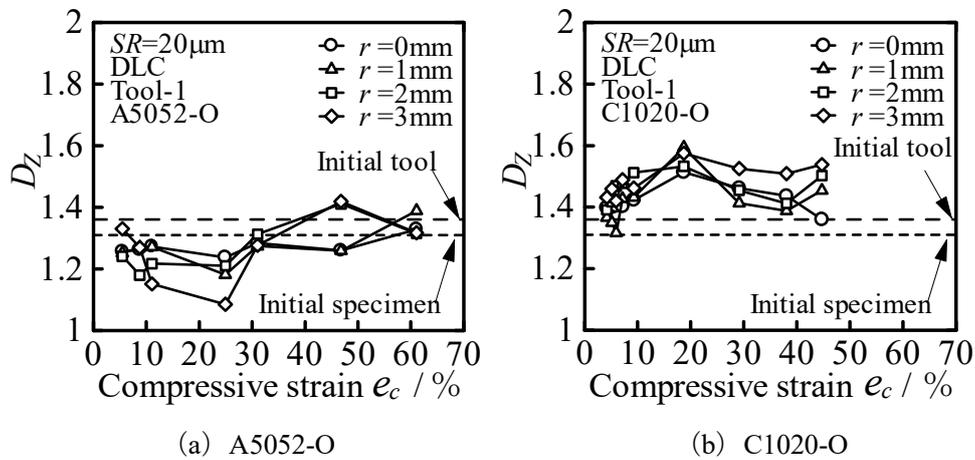


Fig.4.79 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, O 材)

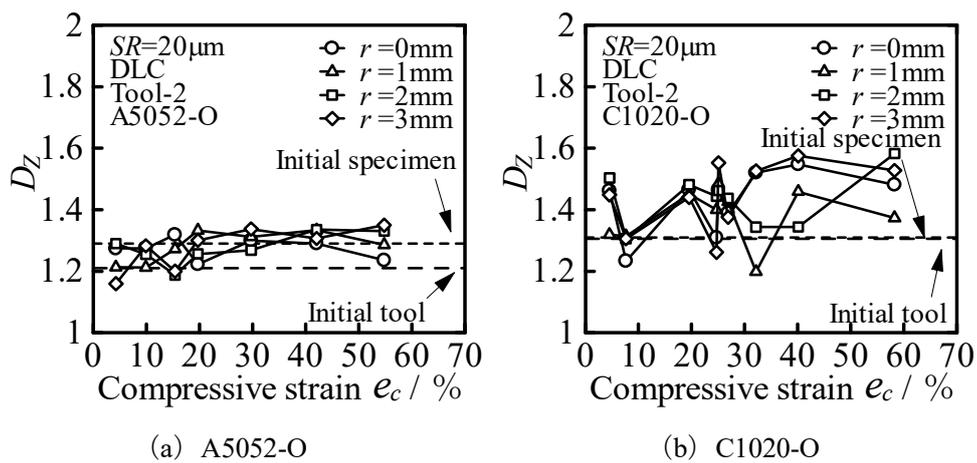
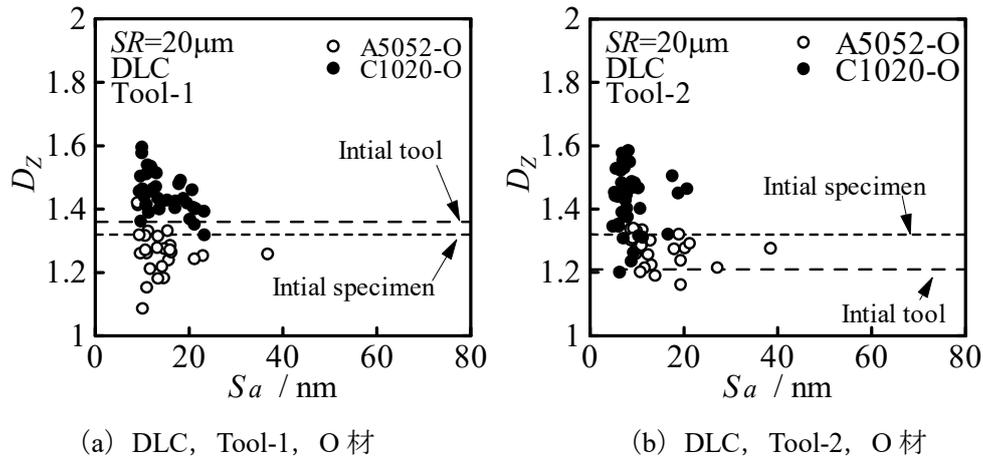


Fig.4.80 零点集合次元 D_z と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, O 材)

Fig.4.81 零点集合次元 D_z と算術平均面粗さ S_a の関係

4.10.4.2 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

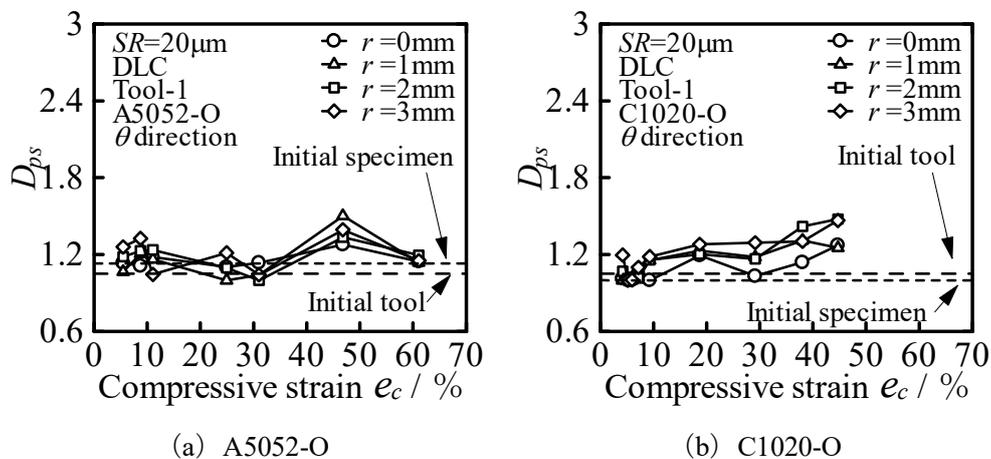
Fig.4.82 に θ 方向, Fig.4.83 に r 方向における Tool-1 のパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向では両者に大きな差は見られないが, r 方向では低圧縮率において A5052-O の方がわずかに D_{PS} が大きくなる傾向が見られる.

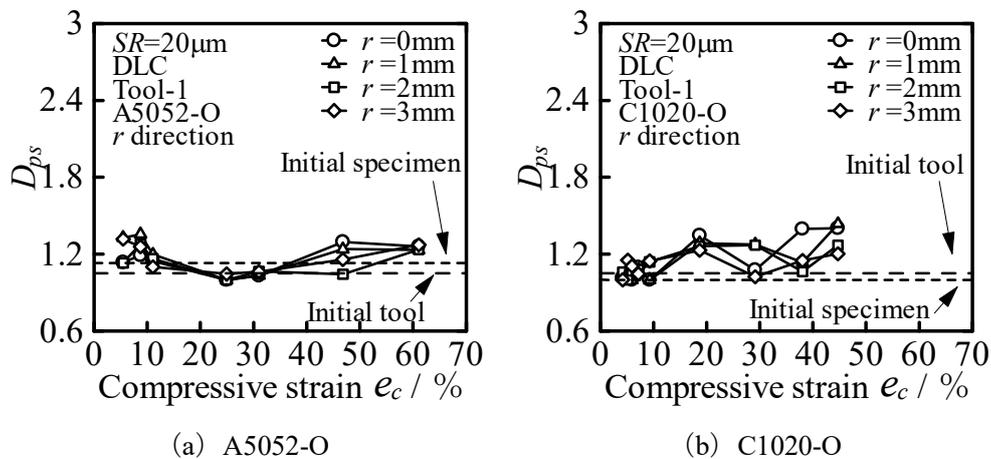
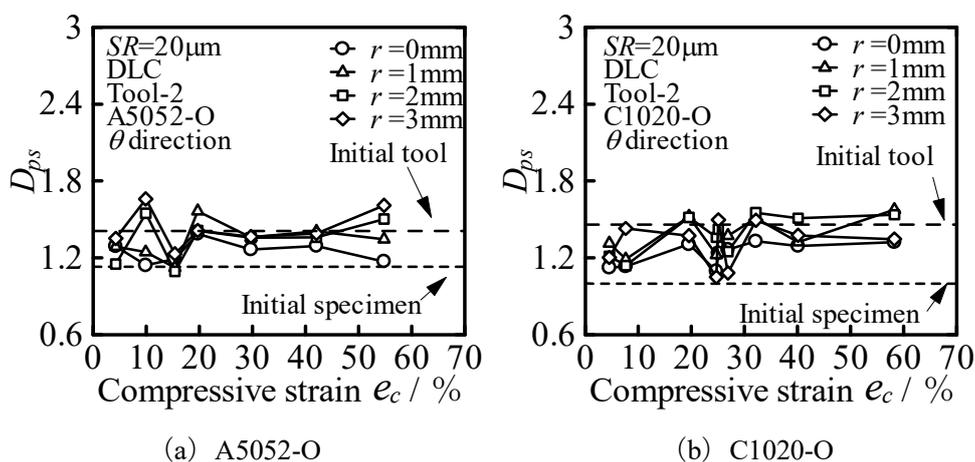
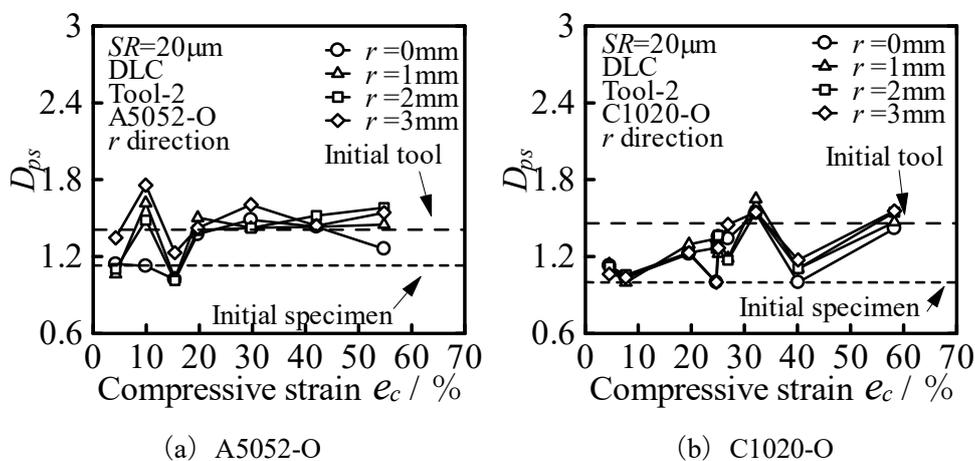
Fig.4.84 に θ 方向, Fig.4.85 に r 方向における Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係を示す. θ 方向では両者に大きな差は見られないが, r 方向では C1020-O の方が圧縮率による D_{PS} の変化が大きくなる傾向が見られる.

Fig.4.86 に θ 方向, r 方向における Tool-1 のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. いずれの方向においても両者に大きな差は見られない.

Fig.4.87 に θ 方向, r 方向における Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. いずれの方向においても両者に大きな差は見られない.

零点集合次元 D_z , パワースペクトル次元 D_{PS} とともに材料による大きな違いは見られない.

Fig.4.82 パワースペクトル次元 D_{PS} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, O材, θ 方向)

Fig.4.83 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-1, O材, r 方向)Fig.4.84 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, O材, θ 方向)Fig.4.85 パワースペクトル次元 D_{ps} と圧縮率 e_c の関係 (DLC, Tool-2, O材, r 方向)

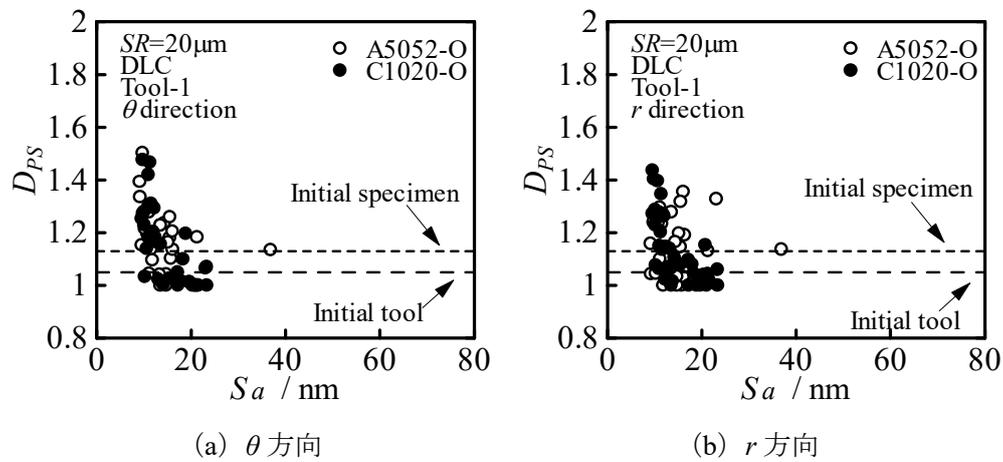


Fig.4.86 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-1, O 材)

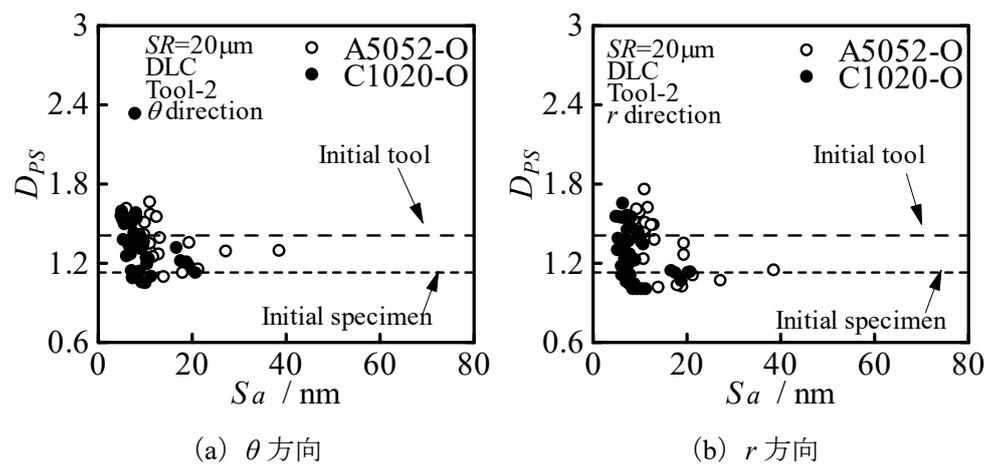
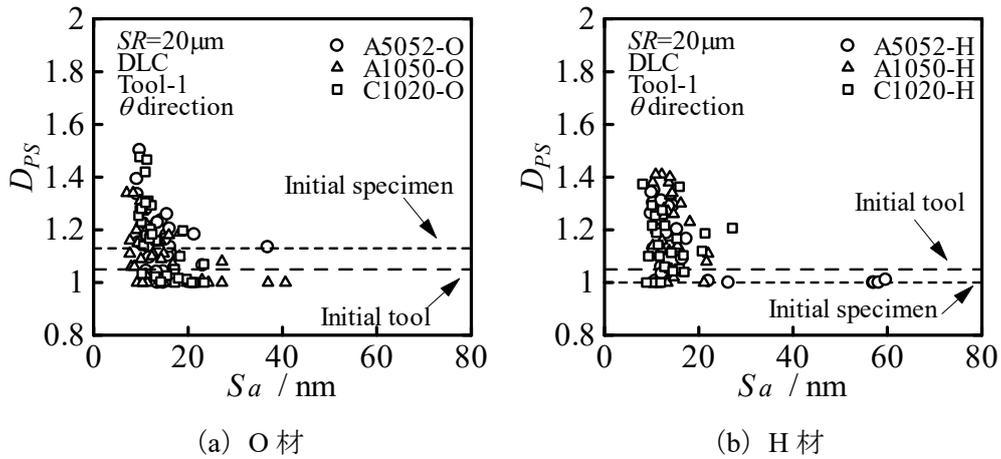
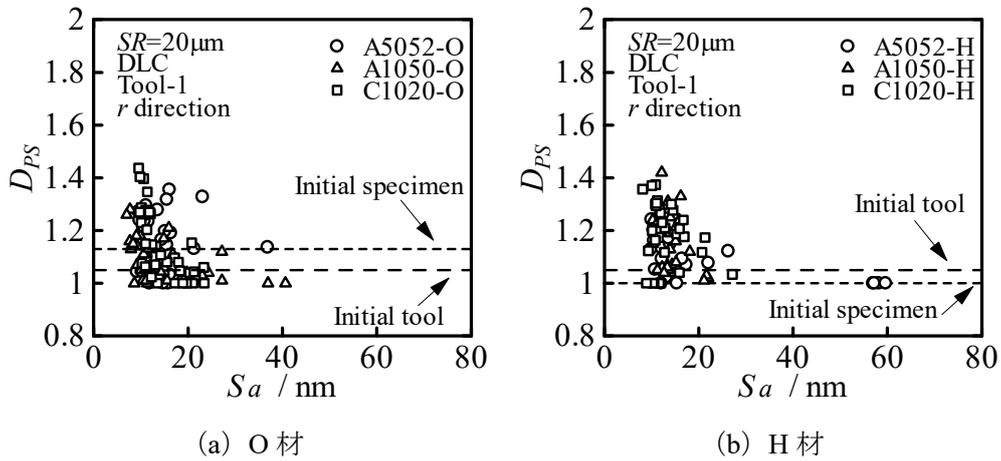
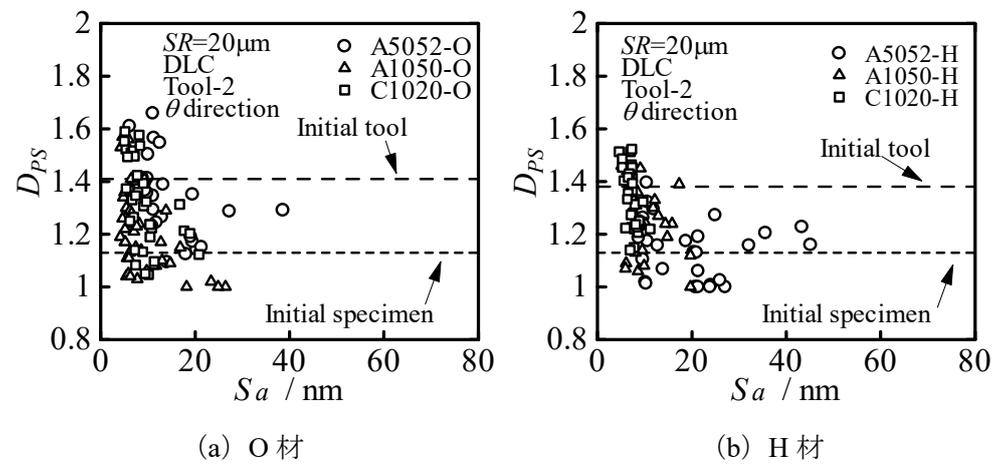


Fig.4.87 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, O 材)

4.11 まとめ

零点集合次元 D_Z については、いずれの条件においてもばらつきが大きく、はっきりとした影響は見られなかった。

Fig.4.88 に θ 方向, Fig.4.89 に r 方向における Tool-1 のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係, Fig.4.90 に θ 方向, Fig.4.91 に r 方向における Tool-2 のパワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係を示す. パワースペクトル次元 D_{PS} は、いずれの条件でもばらつきが大きく条件によるはっきりとした影響は見られないが、平滑化が進むと D_{PS} が大きくなる傾向が見られる。

Fig.4.88 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 (DLC, Tool-1, θ 方向)Fig.4.89 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 (DLC, Tool-1, r 方向)Fig.4.90 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 (DLC, Tool-2, θ 方向)

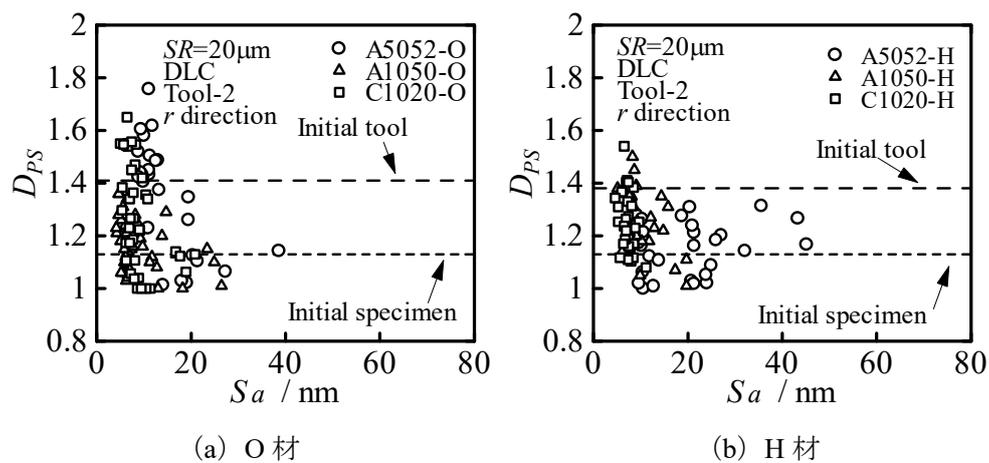


Fig.4.91 パワースペクトル次元 D_{PS} と算術平均面粗さ S_a の関係 (DLC, Tool-2, r 方向)

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。A5052-H と A5052-O について、Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$)、Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$) の工具表面に潤滑剤として DLC コーティングを施した工具を用いて圧縮試験を行い、両者の結果を比較することで工具表面粗さの影響と加工硬化の影響、これまでに行った A1050, C1020 の結果と比較することで材料の影響についても検討した。触針式表面粗さ計・原子間力顕微鏡 (AFM) による表面の観察、有限要素法 (FEM) 解析による変形シミュレーションを行い検討した。また、試験片表面の凹凸形状を複雑さという観点から評価し、超平滑面の創成挙動を検討するために、零点集合次元 D_z 、パワースペクトル次元 D_{PS} を求め、ナノフラクタル構造についても調べた。

以下に本研究によって得られた結果を示す。

- (1) Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$)、A5052-H の場合、低圧縮率から初期工具程度まで平滑化され圧縮率による大きな変化は見られない。中心部よりも外周部の方がより平滑化が進む。
- (2) Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$)、A5052-H の場合、圧縮率 16%程度までは圧縮率が大きくなると平滑化が進むが、初期工具程度までは平滑化が進まず、それ以降では大きな違いは見られない。低圧縮率では中心部よりも外周部の方がより平滑化が進むが、高圧縮率では大きな差は見られない。
- (3) Tool-1 ($R_a=10\text{nm}$)、A5052-O の場合、圧縮率 10%程度までは圧縮率が大きくなると平滑化が進み、初期工具程度まで平滑化され、それ以上の圧縮率では大きな変化は見られない。低圧縮率では中心部よりも外周部の方がより平滑化が進むが、高圧縮率では大きな差は見られない。
- (4) Tool-2 ($R_a=5\text{nm}$)、A5052-O の場合、圧縮率 10%程度までは圧縮率が大きくなると平滑化が進むが、初期工具程度までは平滑化が進まず、それ以降では大きな違いは見られない。低圧縮率では中心部よりも外周部の方がより平滑化が進むが、高圧縮率では大きな差は見られない。
- (5) 工具表面粗さの影響について、A5052-H の場合、いずれの測定箇所においても低圧縮率では大きな差は見られないが、高圧縮率では工具表面粗さの小さい Tool-2 の方が Tool-1 よりも平滑化される傾向がある。また、外周部では中心部と比べその差は小さくなり、Tool-1 では初期工具表面粗さ程度まで平滑化が進むが、Tool-2 では初期工具表面粗さ程度まで平滑化が進まない。
- (6) 工具表面粗さの影響について、A5052-O の場合、いずれの測定箇所、圧縮率においても大きな差は見られなかった。また、Tool-1 では初期工具表面粗さ程度まで平滑化が進むが、Tool-2 では初期工具表面粗さ程度まで平滑化が進まない。
- (7) 加工硬化の影響について、Tool-1 では圧縮率 10%以下で A5052-H の方が平滑化が進み

それ以上の圧縮率ではほとんど差は見られなかった。Tool-2 ではいずれの測定箇所、圧縮率においても加工硬化による大きな差は見られなかった。これらの結果から、加工硬化した材料の方が低圧縮率で平滑化されやすいことがわかる。

- (8) 材料の影響について、H 材の場合、Tool-1 において低圧縮率では A1050-H より A5052-H の方が平滑化が進む。また、低圧縮率では A5052-H より C1020-H の方が平滑化が進む。Tool-2 において A5052-H と A1050-H の間に大きな違いは見られない。また、低圧縮率では A5052-H より C1020-H の方が平滑化が進む。
- (9) 材料の影響について、O 材の場合、Tool-1 において低圧縮率の外周部では A1050-O より A5052-O の方が平滑化が進む。また、低圧縮率の中心部では A5052-O より C1020-O の方が平滑化が進む。Tool-2 において A5052-O と A1050-O の間に大きな違いは見られない。また、低圧縮率では A5052-O より C1020-O の方が平滑化が進む。
- (10) 材料の影響について、低圧縮率ではアルミニウムに比べて銅の方が平滑化が進む傾向が見られた。A5052 と A1050 を比較すると、Tool-1 の低圧縮率では A5052 の方が平滑化が進む傾向が見られた。
- (11) フラクタル解析を行った結果、いずれの条件においても零点集合次元 D_Z 、パワースペクトル次元 D_{PS} に大きな影響は見られないが、平滑化が進むと D_{PS} が大きくなる傾向が見られた。

[参考文献]

- (1) 土屋智由:「超精密加工の最前線」特集によせて,日本機械学会誌,125 卷 1247 号(2022), 4-6.
- (2) 中村保, 近藤一義, 西ヶ谷和栄: 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 卷 530 号 (1990), 268-275.
- (3) 村岡太朗, 浅川基男, 進藤聡, 早川智也, 照田伸二: アルミニウム合金棒材の超平滑化技術の開発, 日本機械学会第 12 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集 (2004), 437-438.
- (4) H. B. Xie, Z. Y. Jiang, W. Y. D. Yuen: Analysis of friction and surface roughness effects on sdge crack evolution of thin strip during cold rolling, Tribology International, Vol. 44, No. 9(2011), 971-979.
- (5) H. J. Li, Z.Y. Jiang, D. B. Wei, J. T. Han, A. K. Tieu: Study on surface asperity flattening during uniaxial planar compression, Wear, Vol. 271, No. 9-10, (2011), 1788-1784.
- (6) H.J. Li, Z.Y. Jiang, D.B. Wei, X.Zhang: Microtexture based analysis of surface asperity flattening behavior of annealed aluminum alloy in uniaxial planar compression, TRIBOLOGY INTERNATIONAL, Vol. 66, (2013), 282-288.
- (7) H. J. Li, Z. Y. Jiamg, D. B. Wei, X. Gao: Influence of Friction on Surface Asperity Flattening Process in Cold Uniaxial Planar Compression(CUPC), Tribology Letters, Vol. 53, No. 2(2014), 383-393.
- (8) 小西智也, 小野寺康, 田中宏昌, 杉村丈一: 潤滑油添加剤による表面粗さと表面反応膜のコントロール, トライボロジスト, 66 卷 11 号 (2021), 853-863.
- (9) 桜田賢人, 西川洋介, 清水さゆり: 電動車向けアルミニウム強電部品用低抵抗表面処理開発, 自動車技術会論文集, 53 卷 1 号 (2022), 77-80.
- (10) 岡田将人, 吉野裕大, 新川真人, 柳嘉代子, 佐々木敏彦: 日本機械学会論文集, 87 卷 896 号 (2021), 21-37.
- (11) Gyo Myeong Lee, Jong Un Lee, Sung Hyuk Park, Sheng Liu: Effect of surface roughness on bending properties of rolled AX31 alloy, Journal of Magnesium and Alloys, Vol. 11, No. 4, (2022), 1224-1235.
- (12) Yizhuo Li, Delphine Retraint, Pengfei Gao, Hongqian Xue, Tao Gao, Zhidan Sun: Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment on Torsional Fatigue of a 7075 Aluminum Alloy, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 12, No. 785, (2022), 1-15.
- (13) 服部清一, 超精密鍛造品のナノ表面特性に関する研究, 平成 14 年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2002).
- (14) 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).
- (15) 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).
- (16) 脇圭希, 圧縮加工によるアルミニウムの圧縮加工による超平滑面創成, 平成 23 年度 修士論文 (三重大学工学部), (2013).
- (17) 宮本達馬, 単軸圧縮加工による超平滑面創成における工具表面膜の影響, 平成 25 年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2013).
- (18) 関悠太郎, 単軸圧縮加工によるアルミニウムの超平滑化に関する検討, 平成 27 年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2015).
- (19) 岩崎達洋, 圧縮加工における工具表面状態と超平滑化の関係, 平成 29 年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2017).
- (20) 鷲一輝, 単軸圧縮加工による超平滑化と工具表面状態の関係, 令和元年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2019).
- (21) 上江州由悟, 単軸圧縮加工による銅の超平滑化条件, 平成 30 年度 修士論文 (三重大学工学部), (2018).
- (22) 松原涼太, 圧縮加工による銅表面の超平滑化条件, 令和 2 年度 修士論文 (三重大学工学部), (2020).
- (23) 水野元揮, 圧縮加工による超平滑面創成と工具表面状態の影響, 令和 3 年度 修士論文 (三重大学工学部), (2021).
- (24) 上江州由悟, 単軸圧縮加工による銅の超平滑化条件, 平成 30 年度 修士論文 (三重大学工学部), (2018), 3-7.
- (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), 23-24.
- (28) 鷲一輝: 単軸圧縮加工による超平滑化と工具表面状態の関係, 令和元年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2019), 13-17.
- (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) 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.
- (31) 脇圭希: 圧縮加工によるアルミニウム表面の超平滑化, 平成 25 年度 修士論文 (三重大学大学院工学研究科), (2013), 27-32.
- (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) 上江州由悟, 単軸圧縮加工による銅の超平滑化条件, 平成 30 年度 修士論文 (三重大学工学部), (2018), 7-16.

- (34)B. B. Mandelbrot: *The Fractal Geometry of Nature*, (1982), 4-5.
- (35)高安秀樹：フラクタル，朝倉書店，(1986)，1-18.
- (36)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.
- (37)黒崎靖，松井正仁：塑性加工表面問題へのフラクタル手法の適用，塑性と加工，40巻，462号(1999-7)，635-639.

謝辞

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

さらに，実験および考察に際して，惜しみないご協力をいただいたナノプロセッシング研究室 Nguyen Quang Long 氏，小幡幸平氏，太田陸斗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。