



K. Hayakawa

スクラッチ試験の有限要素解析による 塑性加工工具被膜はく離評価の高精度化

早川 邦夫*

1. はじめに

塑性加工において、工具に硬質被膜を被膜し、高精度化・高寿命化を目指す事例が多数見受けられるようになってきた。被膜工具では、被膜のはく離が工具寿命に大きな影響を及ぼすため、はく離強度評価が不可欠である。その評価に一般的に用いられるスクラッチ試験は、簡便である、異なる被膜のはく離強度を相対的に評価することが容易である、等の理由で多く用いられている^{1)~6)}。

はく離の評価量である押し込み荷重と、被膜はく離の生じる領域での力学的挙動、例えばはく離時の界面応力、との関係は単純ではない。そのため、スクラッチ試験は、はく離強度の一つの指標のための試験として用いられているのが現状である。スクラッチ試験において、被膜-基材界面で生じている力学的現象をより定量的に評価できる手法を確立できれば、はく離強度評価の高精度化だけでなく、被膜の開発において、界面の処理方法に対する重要な指針を与えることができ、被膜の設計や品質管理等のツールとしてさらなる活用が期待できる。

3次元有限要素解析により、スクラッチ試験中に、被膜基材界面にどのような力学的作用があるかを予測することは十分可能である。そのためには、スクラッチ試験を正確に模擬する必要がある。著者は、これまで解析時に生じる数値解析技術的問題を解明・解決し、より高精度な解析手法の確立を目指し研究を行ってきた。本稿では、その取組みについて述べる。また、本手法のいくつかの応用例として、基材の異なる被膜のスクラッチ試験臨界押し込み荷重の予測の試みと、被膜基材界面の微小凹凸を考慮した場合の界面応力への影響の解析について述べる。

2. スクラッチ試験の概要

硬質被膜の密着性評価法のひとつであるスクラッチ試験について述べる。図1のように、ダイヤモンド製圧子針に、カンチレバーを介して試験片面に押し込み荷重 L_c を負荷する。 L_c を0N から一定速度で増加させつつ、圧子を一定速度で移動させると、被膜・基材の弾塑性変形、被膜のはく離や破壊が生じる。その際の摩擦の変化やアコースティックエミッション (AE) の発生状況などから、被膜はく離時の L_c である臨界押し込み荷重 L_{max} を求める。これを被膜のはく離強度の程度の指標とする。

図1からわかるように、界面の応力状態は、圧子の押し込み量や圧子-被膜間の摩擦などに影響され、 L_c との関係は単純ではないが、3次元有限要素解析を利用することで、界面応力状態とはく離の関係を調査することができる。

3. スクラッチ試験の3次元有限要素解析

図2は、解析に用いた3次元スクラッチ試験モデルを示す。被膜と母材はそれぞれ独立して作成し、被膜と母材の界面部分の節点同士は共有させずに、接触面の法線方向と接線方向の相対変位が共に拘束されている。これにより、節点を共有させるモデルと異なり、被膜-母材間の相互作用による応力をより詳細に把握することが可能となる。この操作によって被膜と母材の結合を表現するものとした。また、スクラッチ痕部分の解析がより詳細にできるように、スクラッチ圧子が移動する部分はより細かい要素分割を施した⁷⁾。

表1は、有限要素解析モデルの節点数と要素数を示す。圧子は、ダイヤモンド圧子を想定し、圧子半径0.2mmの剛体と仮定した。また、被膜は数種類のDLC被膜を想定し、弾性体と仮定した。被膜の物性値を表2に示す。基材としてマルテンサイト系ステンレス SUS440C を想定した。基材の物性値を表3に示す。被膜厚さは3 μ mである。

図3は、圧子の負荷条件を示す。解析の都合上、実際のスクラッチ試験に比べ短い、圧子が1.0mm移動した際に $L_c = 50$ N となるように設定し、その後緩やかに除荷した。解析には、汎用有限要素解析コード MSC.Marc を用いた。

まず、本研究で使用した3次元スクラッチ試験モデルの妥当性を、解析と実験で得られる圧痕形状を比較することで検証する。図4および5は、解析および実験で得

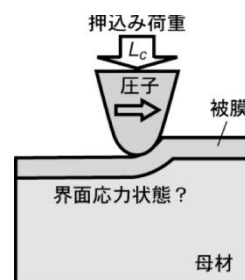
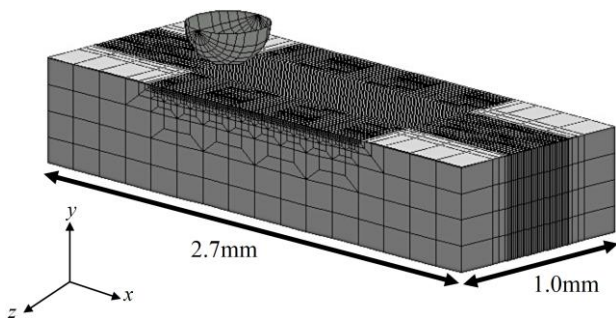
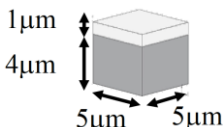


図1 スクラッチ試験の押し込み荷重と界面応力状態

* 静岡大学工学部 教授



(a) 全体モデル



(b) 界面における最小要素寸法

図2 スクラッチ試験有限要素モデル

られた圧痕の形状を示す. 解析結果では, 押し込み深さおよび幅は $6.3\mu\text{m}$ および 0.1mm となっている. また, 実際のスクラッチ試験結果では, 押し込み深さ $6.2\mu\text{m}$ および幅 0.1mm となっていることがわかる. シミュレーション結果と実際のスクラッチ試験の結果には, 圧子の負荷荷重において, 50N と 55N と若干の差はあるが, 押し込みによる変形量は良い一致を示す.

図6は, $L_c = 50\text{N}$ を作用させたときの界面垂直応力 σ_{int} および界面せん断応力 τ_{int} の分布の解析結果を示す. これらの図は, 界面側から被膜を見たものである. 被膜材料は DLC-Si, 基材はマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS440C を仮定している. 図中の記号 X は, 圧子の中心位置を, 線分 AB および CD は σ_{int} および τ_{int} の最大値を取る位置を結んだ線分である. この場合, σ_{int} および τ_{int} とともに, スクラッチ溝の縁の内側の位置で最大となっている. 実際のス

表1 有限要素モデルの節点および要素数

	節点数	要素数
被膜	85316	62928
基材	113883	100928

表2 被膜材料の物性値

材料	ヤング率 E/GPa	ポアソン比 ν
DLC	150	0.2

表3 基材の材料および物性値

材料/物理量	名前/値
材料	SUS440C
ヤング率 E/GPa	206
ポアソン比 ν	0.3
塑性係数 F/MPa	3700
加工硬化指数 n	0.23
初期塑性ひずみ ϵ_0	0.0425

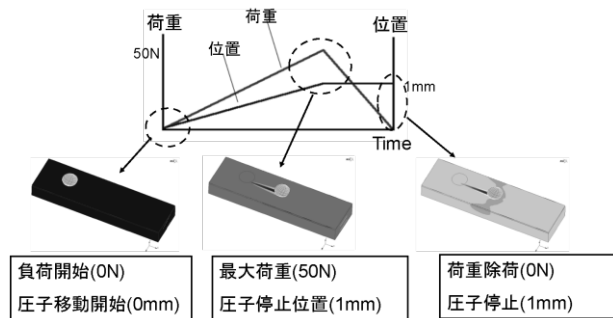
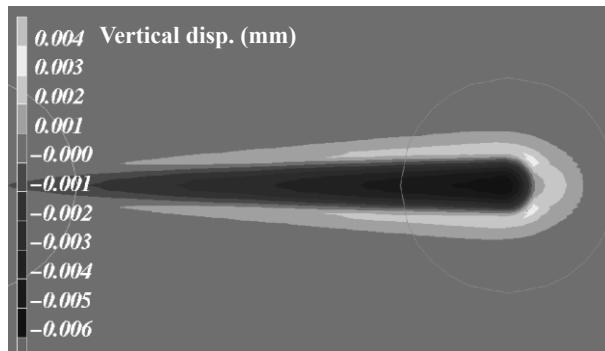
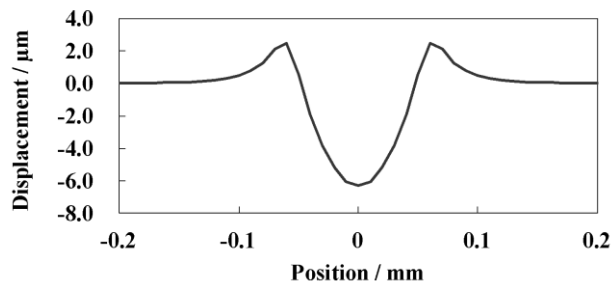


図3 圧子の移動および負荷条件



(a) 有限要素解析結果



(b) 断面形状 (最深部)

図4 スクラッチ試験有限要素解析による溝深さの結果

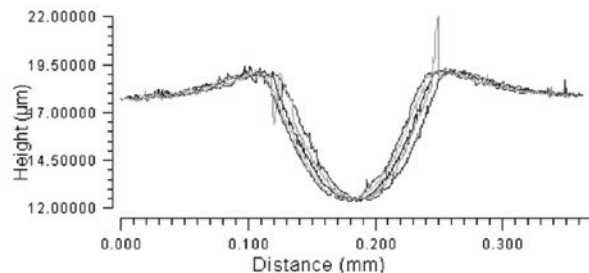


図5 実験によるスクラッチ溝断面

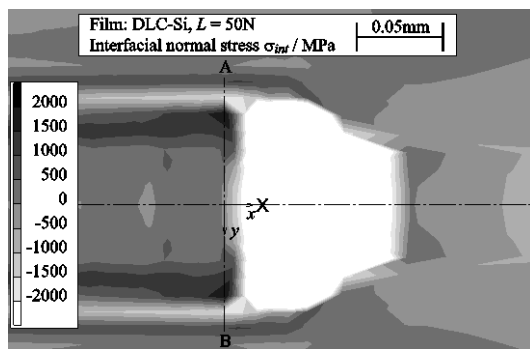
クラッチ試験においても, 溝の縁から内側の部分ではなく離が発生していることが多く見られる. すなわち, 実際には離の生じる位置で, σ_{int} および τ_{int} がともに最大値を取ることがわかる. また, σ_{int} は圧子の後方, τ_{int} は圧子の前方で最大となることもわかる.

図7は、被膜に DLC-Si および TiN を用いた時の、図6中の線分 AB および CD に沿った σ_{int} および τ_{int} を示す。特に、 τ_{int} の分布に大きな違いがあることがわかる。これは、TiN の弾性係数が DLC-Si のそれより約2.7倍大きいことが、特にせん断方向への変形の抵抗として大きく影響しているものと考えられる。

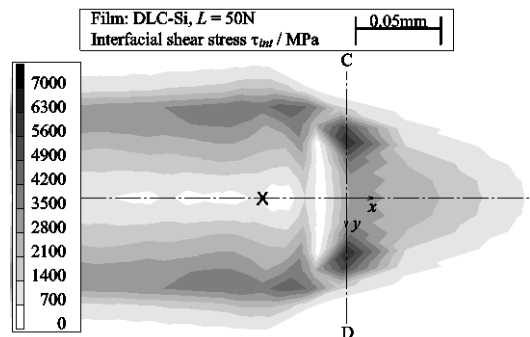
図8は、圧子-被膜間のクーロン摩擦係数 μ を変化させた時の、 $L_c = 50N$ 時における σ_{int} および τ_{int} の分布を示す。この場合でも、 σ_{int} の最大値の差はほとんど生じなかった。これから、せん断応力が被膜-圧子間の摩擦の影響を受けやすく、それがはく離強度指標の L_{max} に影響を与えることが推測される。

図9は、被膜を DLC-Si、基材に SUS440C、SUS304、A2024 および WC-Co を用いた時の $L_c = 50N$ 時における界面応力の変化を示す。これらの基材の降伏応力は1300、320、170 および 2400 MPa である。この場合も、(a)の界面垂直応力の最大値にはほとんど差はない。しかし、(b)のせん断応力分布については、図に示すとおり基材の降伏応力の影響が顕著に表れる。

以上、図7～9から、スクラッチ試験から得られる L_{max} は、界面のせん断強度、材料や環境の変化に敏感であることがわかる。

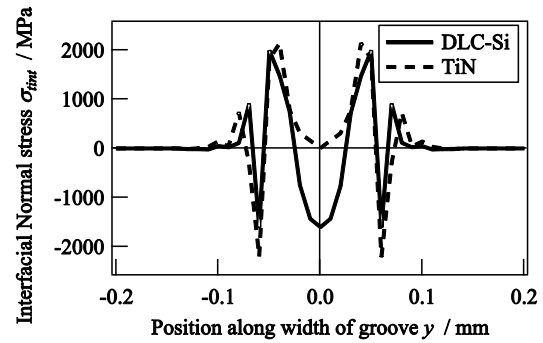


(a) 垂直応力分布

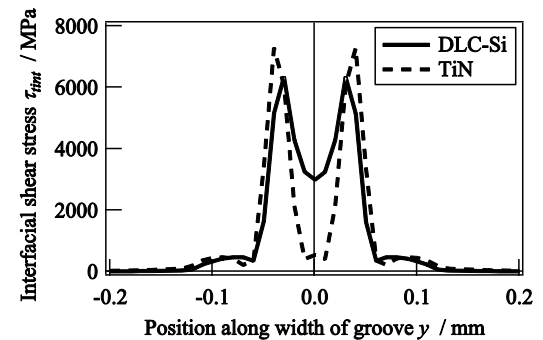


(b) 界面せん断応力分布

図6 界面応力分布 (被膜: DLC-Si, 基材: SUS440C)



(a) 界面垂直応力



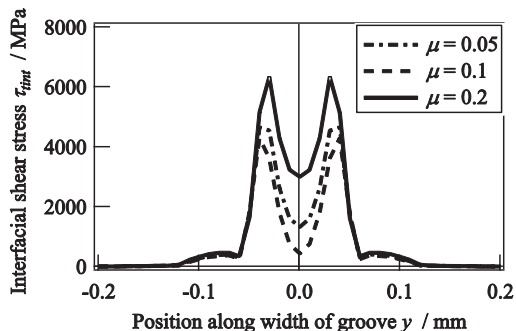
(b) 界面せん断応力

図7 被膜材料の違いによる界面応力の違いの一例 (DLC-Si および TiN)

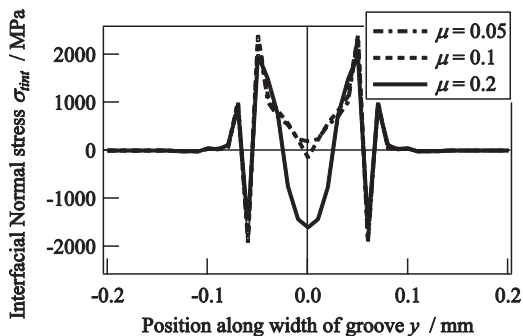
4. 有限要素解析による臨界押し込み荷重のはく離形態に及ぼす影響に関する検討

実際のスクラッチ試験では、 L_{max} の大小に関連してはく離形態にも違いがあることが観察される。図10は、 L_{max} が約20N および50N におけるはく離の発生状況の観察写真を示す。 L_{max} が小さいとき、圧子の前方および側方周辺にはく離が見られる。一方、 L_{max} が大きい場合、はく離は、圧子後方側面に見られ、また、圧子の通過後の被膜に円弧状の割れが見られる。図11は、種々のはく離の発生位置とその力学的メカニズムの模式図を示す。圧子周縁部のはく離は、(a)や(b)のように圧子の押し込みによる膜の押し出しと曲げによって、周縁部の界面に引張応力が発生して生じると考えられている。一方、(c)や(d)は、界面はく離強度が高く、はく離の原因が、被膜自身の破壊に起因する場合を示す。この場合は、被膜自身の破壊強度がはく離を律することになる。

次に、実際のスクラッチ試験において、 L_{max} が20N および40N 程度であった被膜のはく離形態について議論する。図13は、 $L_c = 20N$ における σ_{int} および $L_c = 40N$ における被膜に作用するスクラッチ方向の垂直応力 σ_{11} の分布を示す。

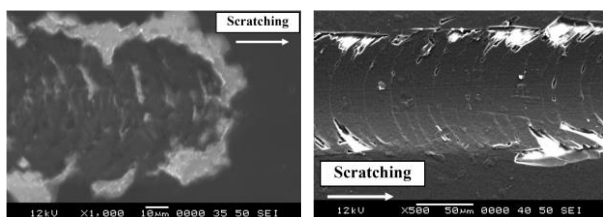


(a) 界面垂直応力分布



(b) 界面せん断応力分布

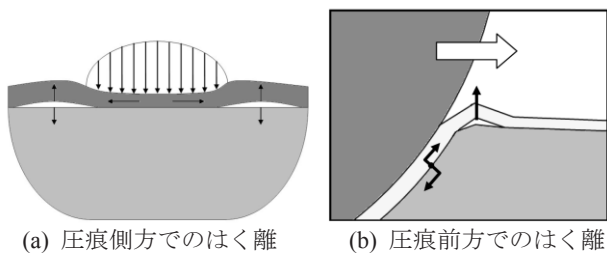
図8 界面応力に及ぼす圧子-被膜間の摩擦の影響の一例 (被膜: DLC-Si, 基材: SUS440C)



(a) $L_{max} = 20N$

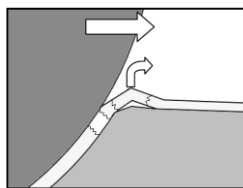
(b) $L_{max} = 50N$

図9 クラッチ試験における臨界押し込み荷重時の被膜のはく離形態

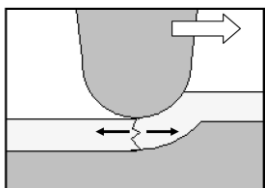


(a) 圧痕側方ではく離

(b) 圧痕前方ではく離

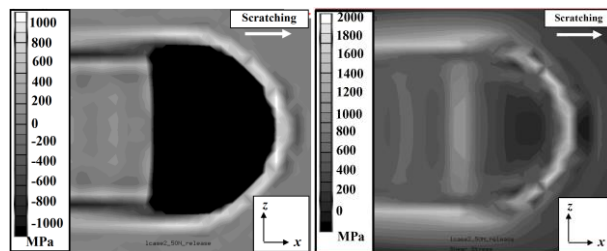


(c) 圧痕前方での被膜破壊を伴うはく離

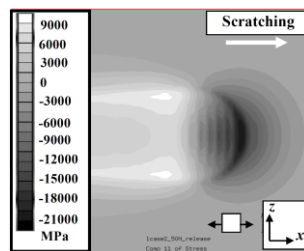


(d) 圧痕後方での被膜破壊を伴うはく離

図10 スクラッチ試験における主なはく離形態⁸⁾



(a) $L_c = 20N$ における界面の垂直およびせん断応力分布



(b) $L_c = 40N$ における被膜のx軸方向垂直応力分布

図11 スクラッチ試験における界面垂直応力およびスクラッチ方向垂直応力の分布

まず, L_{max} が小さいときははく離について, 図10(a)と図12(a)から, 界面に作用する σ_{int} および τ_{int} が被膜はく離の原因であることが示唆される. 一方, 図10(b)と図12(b)を比較することにより, L_{max} がある程度大きい場合, 被膜は圧子の後方に発生する σ_{11} による割れにより引き起こされることが示唆される. また, σ_{11} の等高線は, 円弧状に分布しており, これは図10(b)に見られる圧子後方の円弧状の亀裂に対応しているものと考えられる.

5. 臨界押し込み荷重の予測の試み

著者らは, 図6~8で明らかになっているように, DLC-SiとSUS440Cの組合せにおける L_{max} (約50N) に対応する界面せん断応力の最大値が約6.4GPaであることを利用し, 種々の基材に対する臨界押し込み荷重値の予測法を提案した. すなわち, DLC-SiとSUS304, A2024およびWC-Coの組合せのスクラッチ試験の有限要素解析により, 界面せん断応力の最大値が約6.4GPaになるときの L_c を, その組合せにおける L_{max} の予測値 L_{ce} とする方法である.

表4は, 予測に用いた基材材料と機械的特性を示す.

図12は, 提案した手法による基材の降伏応力 σ_Y あるいはビッカース硬さ HV と L_{ce} との関係を示す. また, 実際の L_{max} と σ_Y の関係も図中にプロットした. 硬度の大きな基材については, 本予測法は簡便ではあるが, 良い一致を示す. 一方, 硬度の小さな基材については, 実験結果との差が大きい. これは, 硬度の小さな基材の場合, 圧痕の深さが大きくなり, せん断応力の解析精度が低下することが主な原因として考えられる. その解決には, 解析に改善の余地があると思われる今後の課題である.

さらに, 界面はく離強度が, 単に界面せん断応力で予測できるという仮説にも検討の余地がある. また, 界面の物

理化学的力や凹凸の影響, さらには, 界面垂直およびせん断応力に関連した, 相当応力のようなはく離強度規準の存在も示唆される.

表4 臨界押し込み荷重の予測に用いた基材材料と機械的特性

材料	ヤング率 E / GPa	ポアソン比 ν	降伏応力 σ_Y / MPa	硬さ HV
SUS440C	206	0.3	540	600
SUS304	190	0.3	313	200
Al alloy	65	0.33	167	120
WC-Co	490	0.3	2320	1400

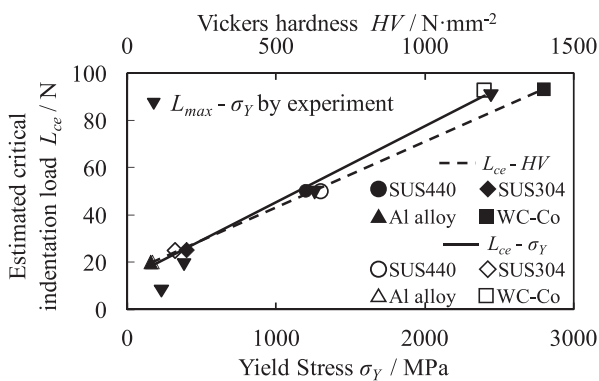


図12 基材の降伏応力あるいは硬さと予測臨界押し込み荷重の関係 (被膜: DLC-Si)

6. 界面の微小凹凸の被膜強度におよぼす影響に関する有限要素解析の一例

被膜の密着強度を向上させるための手法として, 被膜-基材界面に凹凸を付与する手法が提案されている. 時にはナノオーダーともなるこの凹凸の効果を, 図1のようなモデル全体で解析することは, 計算コストが膨大になり, 現実的ではない. そこで, 図13のように広範囲の変形を解析するマクロ解析と着目したい一部分だけを拡大し詳細に解析するマイクロ解析で構成されるズーミング法を採用して, スクラッチ試験における界面の微小凹凸の界面応力に及ぼす影響を解析することを試みた. なお, 本解析では, マクロモデルとマイクロモデルの大きさの乖離がなお大きいため, その中間の大きさのモデル (メゾモデル) を介して微小凹凸の界面応力に及ぼす影響を解析した. このような2段階ズーミング法は, 精度の低下は否めないもののスケール差が非常に大きい場合, 例えば, 造船における船体全体と内部コンパートメント部材の関係など, に適用事例がある.

図14は, 微小凹凸を考慮したマイクロモデルを示す. 要素数および節点数はそれぞれ約16万および約20万である. このモデルを, 圧子の進行方向が長手方向になるように,

すなわち, 圧死が凹凸周期と垂直に進行するように配置した. その配置する位置は, マクロモデルの解析において, 押し込み荷重が20Nの時に界面垂直応力および界面せん断応力が最大となる位置とした.

図15は, マクロ解析で最大の界面垂直応力の発生した位置でのマイクロ解析による界面垂直応力の圧子進行方向の変化を示す. 図中には, 界面凹凸のないマイクロモデルでの解析結果 (Flat model) を併記している. また, 界面凹凸形状 (Shape of Interface) も示している. 界面凹凸のある場合, 凸の部分の垂直応力は負, すなわち圧縮となり, はく離への寄与はほとんどない. 圧子進行方向長さで平均を取ると, 凹凸のない場合より, はく離に寄与する応力, すなわち界面引張り垂直応力の影響が小さくなることがわかった. これにより, はく離に対する抵抗が向上するものと考えられる.

図16は, 界面凹凸上に発生する界面垂直応力を示す. さて, 図14のモデルにおいて, はく離に寄与する垂直引張り応力による単位面積当たりの弾性ひずみエネルギーを計算してみると, その値は界面が平坦な場合に比べて約半分となることがわかった. 密着力には, このような力学的な効果 (アンカー効果) の他にも, 物理化学的な効果があるため軽々には言えないものの, この解析から界面の微小凹凸は密着性の向上に効果があることが示唆される.

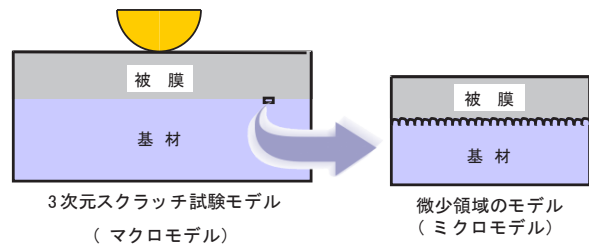


図13 界面微小凹凸を考慮するためのズーミング法の概略図

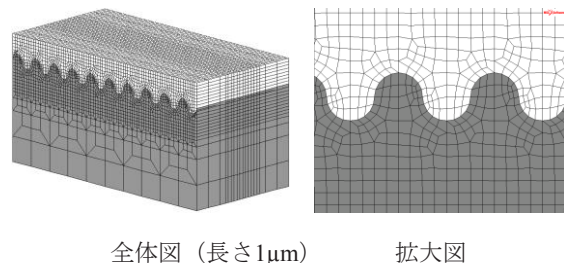


図14 界面微小凹凸を考慮したマイクロモデル (微小凹凸は幅が50nm, 高さが100nm)

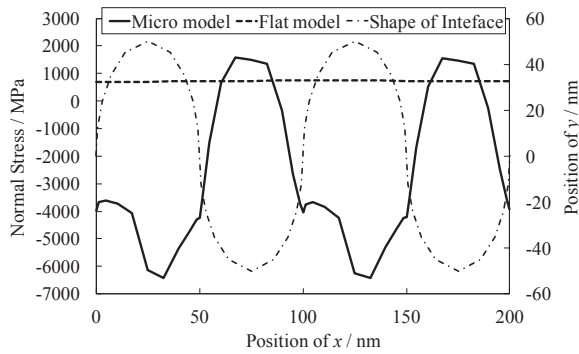


図 15 ミクロ解析による界面垂直応力の圧子進行方向変化

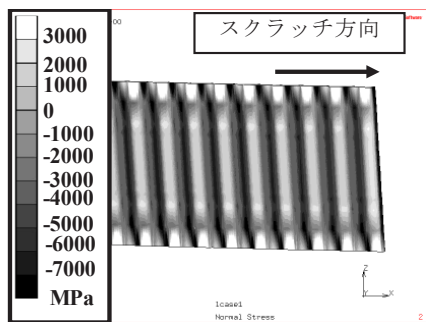


図 16 ミクロ解析による界面垂直応力分布

7. おわりに

スクラッチ試験を再現する3次元の有限要素解析を行い、臨界押し込み荷重時における界面の応力状態を解明する試みについて、著者の行った研究を紹介した。また、その応用の一例として、界面せん断応力がある一定の値に達したときにはく離が発生するという仮定の下で、基材の種類による臨界押し込み荷重の変化を予測する手法を提案した。最後に、界面の凹凸が界面応力やはく離のエネルギーに与える影響を解析するため、2段階のズームング法を用いた手法を紹介した。このような取組みにより、スクラッチ試験の信頼性・有用性を高め、被膜間の比較や定性的な評価にとどまらず、はく離強度の増加に有効な界面性状の評価などに応用されることが期待される。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成により実施した研究に基づいていることを付記し、同財団に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) Mori, H. & Tachikawa, H.: Increased adhesion of diamond-like carbon-Si coatings and its tribological properties, *Surface & Coatings Technology*, **149** (2002), 225-230.
- 2) 山崎徹: 反応性イオンプレーティングによる窒化チタン被膜, *日本時計学会誌*, No.86 (1978), 50-65.
- 3) 後藤征司ほか: PET ボトル DLC バリア膜の高速・高バリア成膜技術, *日本機械学会年次大会講演資料集 No.8* (2006), 123-124.
- 4) 金原繁ほか: トライボロジー・内部応力・密着性 薄膜の力学的特性評価技術, (1992), リアライズ AT.
- 5) 新井大輔: 薄膜の密着性—マイクロスクラッチ試験機を用いた薄膜密着性の評価方法, *表面技術*, **58-5** (2007), 295-299.
- 6) 中庸行ほか: a-SiC 薄膜および DLC/a-SiC 積層薄膜の付着強度評価クライテリアの検討, *日本機械学会論文集 A 編*, **66-644** (2004), 698-705.
- 7) 早川邦夫・森広行・三井正法・中村保・田中繁一: スクラッチ試験における被膜-基材界面応力状態に対する有限要素解析, *塑性と加工*, **52-610** (2011), 1181-1186.
- 8) 河鱈実昌: 硬質被膜内の応力解析による被膜損傷メカニズムの推定, *デンスーテクニカルレビュー*, **12-2** (2007), 47-53.
- 9) 早川邦夫・森広行・三井正法・中村保・田中繁一: スクラッチ試験における基材の界面応力におよび影響に関する有限要素解析, 第60回塑性加工連合講演会, (2009), pp.235-236.
- 10) Hayakawa, K., Mori, H., Koyabu, K., Nakamura, T. & Tanaka, S.: Analysis of Effect of Substrate Material on Interfacial Stress State in Scratch Test, *Proceedings of Metal Forming 2012* (2012), pp. 1027-1030.
- 11) 小藪恵太・早川邦夫・森広行・中村保・田中繁一: スクラッチ試験における界面の微小凹凸の被膜強度におよぼす影響に関する有限要素解析, 平成23年度塑性加工春季講演会, (2011), pp. 45-46.
- 12) 早川邦夫・森広行・小藪恵太・中村保・田中繁一: スクラッチ試験における微小凹凸を有する被膜-基材界面応力状態の解析精度向上に関する検討, 第62回塑性加工連合講演会, (2011), pp. 451-452.