

スクラッチ試験による塑性加工工具被膜はく離評価の高精度化

静岡大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

准教授 早川邦夫

(平成 22 年度一般研究開発助成 AF-2010015)

キーワード：スクラッチ試験，硬質被膜，はく離，界面応力，有限要素法

1. 研究の背景と目的

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その評価が不可欠である．

被膜のはく離強度評価に一般的に用いられるスクラッチ試験は，簡便であり，多く用いられている^{1)・6)}．しかし，評価される押込み荷重と，被膜はく離部分で生じる力学的挙動（はく離時の界面応力）との関係は単純ではなく，その解明はそれほど進んでいない．そのため，スクラッチ試験は，単なるはく離強度の比較のためのテストとして用いられているのが現状である．

簡便な試験法であるスクラッチ試験で得られる押込み荷重に加え，被膜-母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，被膜開発における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，設計値，品質管理のツールとして活用できる．

スクラッチ試験の 3 次元有限要素解析により，被膜はく離時にどのような界面応力が作用しているかを予測するためには，スクラッチ試験を正確に模擬する必要がある．本研究では解析時に生じる数値解析技術の問題を解明・解決し，より高精度な解析手法を確立する．現状の押込み荷重による評価では，ばらつきが非常に大きく，定量的な評価は困難であり単なる比較テストとして用いられている状況である．真のはく離強度を評価するために真に問題となるのは界面はく離応力であり，これを解析・および実験の両方から解明する．

2. 被膜の密着性評価方法

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 は，圧子と被膜の関係を示す．ダイヤモンド製圧子針を，カンチレバーを介して試験片面に押込み荷重 L_c を負荷する． L_c を増加させつつ，圧子を平行に振動させると，界面のはく離や被膜破壊などが生じる．その際の摩擦の変化やアコースティックエミッションの発生状況などから，被膜はく離時の押込み荷重 L_{max} をはく離荷重として，被膜のはく離強度の程度を評価する．

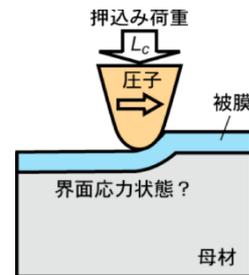
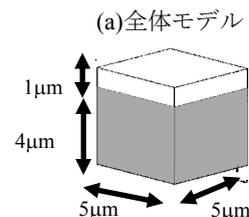
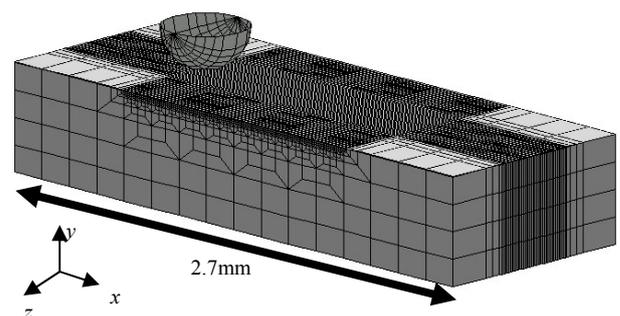


図 1 スクラッチ試験の押込荷重と界面応力状態

3. スクラッチ試験の 3 次元有限要素解析

3.1 解析モデル概要

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出来るように，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⁾．



(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

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。母材はマルテンサイト系ステンレス SUS440Cを想定した。母材の物性値を表3に示す。被膜厚さは3 μm である。

負荷条件を図3に示す。実際のスクラッチ試験に比べ短いですが圧子が1.0mm移動した際に L_c が最大荷重 L_{max} となるように設定した。その後緩やかに除荷した。

解析には、MSC.Marc 2008r1を用いた。

3.2 解析結果

ここでは、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について検討する。

まず、解析モデルの妥当性を、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られた圧痕形状を示す。解析結果では、押し込み深さが6.3 μm 、幅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 μm 、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、若干差はあるが、押し込みによる変形量は良い一致を示す。

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
母材	113883	100928

表2 被膜物性値

材料	ヤング率 E / GPa	ポアソン比 ν
DLC	150	0.2

表3 母材物性値

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

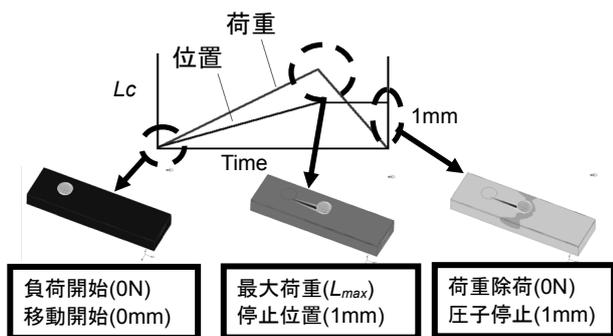
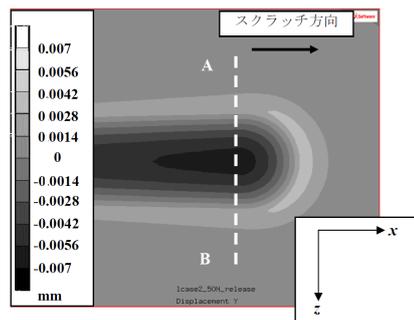
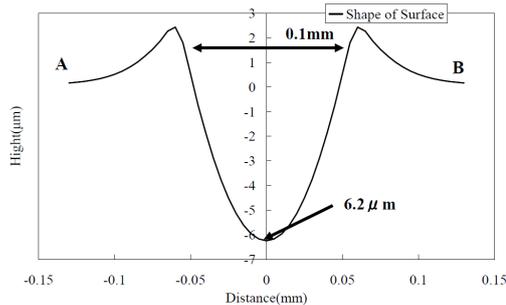


図3 圧子の移動および荷重条件



(a) 押し込み深さ



(b) 断面形状

図4 スクラッチ溝深さの解析結果

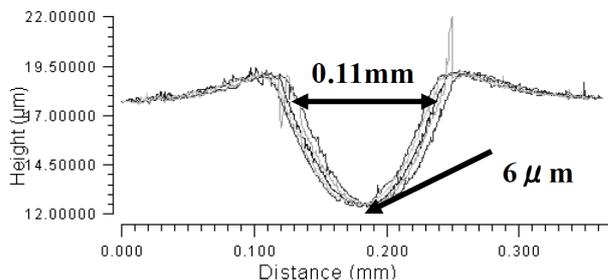
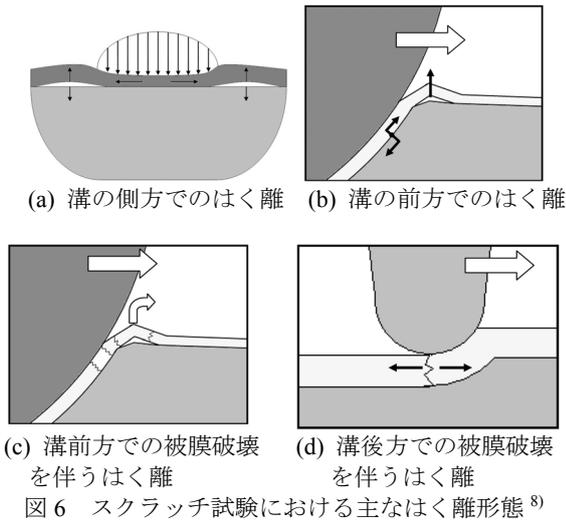


図5 実験によるスクラッチ溝断面

4. 界面応力分布と実際のスクラッチ試験の比較

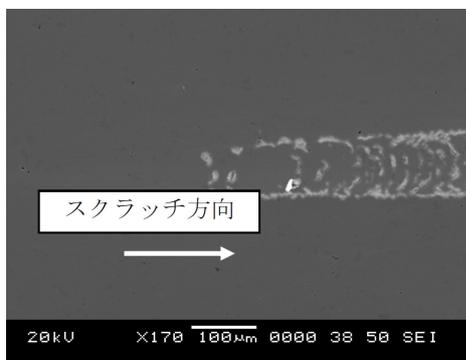
実際のDLC被膜のスクラッチ試験で生じる損傷と解析結果の比較を行う。実験にはCSM社製スクラッチ試験機REVETESTを使用した。試験片は2種類のDLC被膜DLC-1およびDLC-2と、DLC-Si被膜を使用した。

図6は、スクラッチ試験における被膜損傷の形態と圧子による負荷・変形状態の模式図を示す⁸⁾。(a)は、被膜の密着強度の低いときに、圧子が被膜を圧縮することで被膜が周囲に変位する際に発生する形態である。(b)は、スクラッチ溝が形成される際、前方に移動する被膜と母材の界面の垂直方向の変位の差により発生するはく離である。(c)は、スクラッチ溝が比較的深いとき、被膜が圧縮により破壊を生じる際にはく離する形態である。最後に(d)は、被膜が圧子の後方で引張りを受け破壊する際に発生するはく離形態を示す。

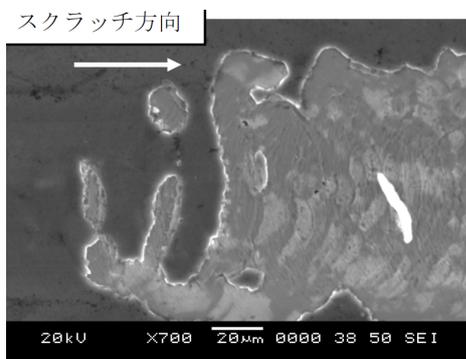


4.1 スクラッチ試験結果

図7は、DLC-1 および DLC-2 に対するスクラッチ試験で生じた被膜損傷を示す。(a)のDLC-1は $L_{max} = 15N$ 、(b)のDLC-2は $L_{max} = 20N$ ではく離が生じた。密着性の低い場合、 $20N$ 程度で圧痕内部や圧痕外部ではく離が発生し始める。密着性の高い場合はふちに近い位置の圧痕内部ではく離が発生し始め、その後、圧痕中央ではく離が発生する。これらのはく離形態は、図6の(a)や(b)に対応すると考えられる。



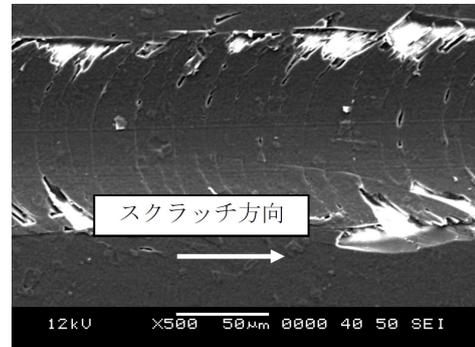
(a) DLC-1 はく離状態 ($L_{max} = 15N$)



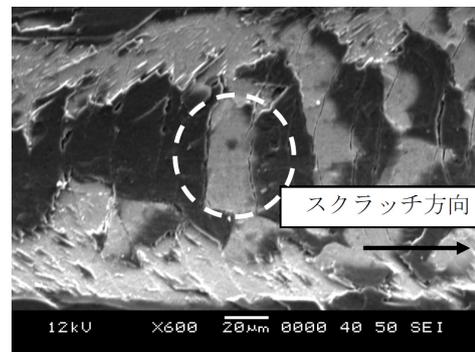
(b) DLC-2 はく離状態 ($L_{max} = 20N$)

図7 DLC被膜のはく離状態

図8は、DLC-Si被膜の損傷状態を示す。(a)は $L_{max} = 50N$ 、(b)では $L_{max} = 70N$ ではく離が生じた。はく離は、圧痕内部の圧子の進行方向と逆向きの弧を描いた亀裂周辺に生じている。これらのはく離形態は、図6(c)および(d)に示すように、圧子による被膜の引張り応力によって、被膜の破壊により引き起こされるものと考えられる。



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



(a) $L_{max} = 70N$

図8 DLC-Si被膜のはく離状態

4.2 スクラッチ解析結果と実験結果との比較

4.1節の実験結果を、3次元有限要素解析結果をもとに考察する。

まず、臨界押し込み荷重が低い場合のはく離形態について考察する。図9は、 $L_c = 20N$ における界面応力分布の解析結果を示す。(a)の界面垂直応力、(b)の界面せん断応力ともに、圧痕周縁部、圧痕内部で高い応力を示している。圧痕周縁部のはく離は、図6(a)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り応力が発生して生じると考えられている。また、圧痕内部に発生する三日月形のはく離は、図6(b)のように圧子前方の膜の圧縮による座屈や、圧子と膜の摩擦によって発生するせん断応力が原因と考えられる。臨界押し込み荷重が小さい時点ではく離は、界面せん断応力よりも、被膜の圧縮により発生する界面垂直方向変位の発生にともなう界面垂直応力の影響が強いと考えられる。

次に、臨界押し込み荷重が大きい場合のはく離形態について考察する。図10(a)および(b)は、 $L_c = 40N$ における界面上被膜内の σ_x および τ_{xz} の応力分布を示す。実験によ

るはく離の発生位置 (図 8(a)) と同様の側方の辺縁に近い位置の圧痕内部で, σ_x および τ_{xz} は 9000MPa および 16000MPa と大きな値となっている. このことから, 亀裂発生後も膜が引っ張られることで被膜の亀裂を起点とし

てはく離に至ると考えられる.

5. 結 言

硬質被膜のはく離強度を評価するためのスクラッチ試験について, 3次元有限要素法を用いて, 被膜-母材界面の応力状態や被膜内部の応力状態を評価した. さらに, 実際のスクラッチ試験結果と比較することで, 臨界押し込み荷重の違いにより, 被膜破壊を支配する機構の違いを推測した. すなわち, 臨界押し込み荷重の低い被膜では, 界面に発生する界面垂直応力がはく離を生じさせる. 一方, 臨界押し込み荷重の高い被膜では, 被膜内のせん断応力や垂直応力による被膜破壊に引き続いてはく離が生じることを示唆した.

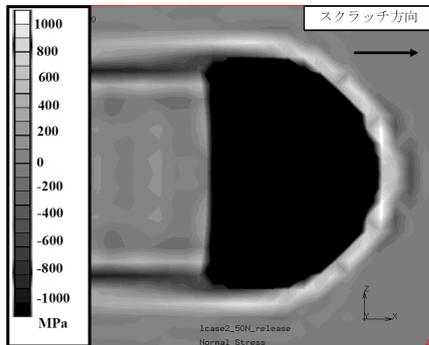
今後, 被膜破壊と界面はく離をより精密な実験により識別できれば, 有限要素解析においても被膜損傷モデルや界面はく離モデルの援用により, より高精度な解析が可能となり, スクラッチ試験の高精度化に寄与するものと考えられる. また, 界面のアンカー効果や中間被膜の効果についても, 解析によりそのメカニズムを明らかに出来ると考えられる.

謝 辞

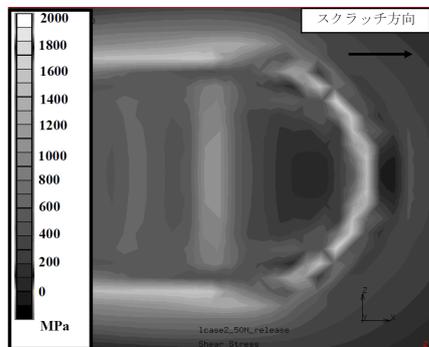
本研究は, 財団法人 天田金属加工機械技術振興財団 (現 公益財団法人 天田財団) 一般研究開発助成 AF-2010015 の援助のもと行われました. ここに深甚なる謝意を表します.

参考文献

- 1) H. Mori and H. Tachikawa : 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, *日本機会学会論文集(A 編)*, **66-644** (2004), 698-705.
- 7) 早川邦夫ほか : 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, *デンソーテクニカルレビュー*, **12-2** (2007), 47-53.

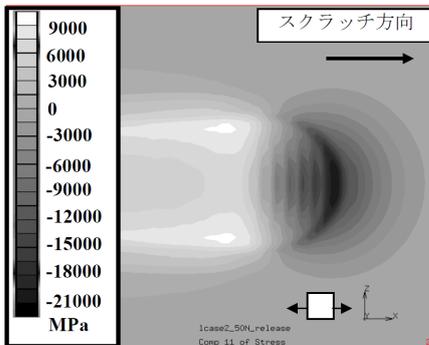


(a) 界面垂直応力分布

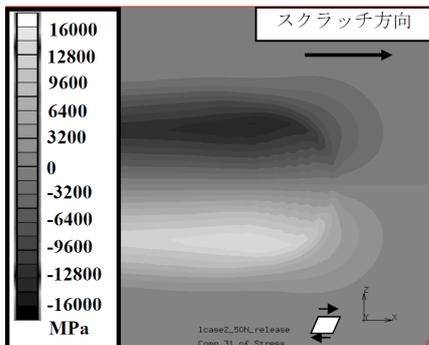


(b) 界面せん断応力分布

図 9 $L_c = 20N$ 時の界面応力状態



(a) 被膜内 σ_x の分布



(b) 被膜内 τ_{xz} の分布

図 10 $L_c = 40N$ 時の界面応力状態