

# 切削原理を利用した薄膜界面強度評価

慶應義塾大学[院] 石井大輔 慶應義塾大学 ○大宮正毅

アルテアエンジニアリング(株) 星野裕昭

Evaluation of interfacial strength with cutting method

Daisuke ISHII, Masaki OMIYA and Hiroaki HOSHINO

## 1. はじめに

近年、微小で鋭利な切刃を試料の表面から界面にかけて切削し、その際の切削抵抗を測定することで、コーティング材料の表面・界面の機械的性質を調べる装置 (Surface And Interfacial Cutting Analysis System, SAICAS) が提案され<sup>(1)</sup>、塗装膜や高分子材料などの機械的特性評価に適用されてきた<sup>(2)</sup>。SAICAS法では、基材とコーティング膜の界面をはく離させ、切刃が受ける水平方向の抵抗力から、界面のはく離強度を定義し、それらを用いてコーティングの界面強度評価を行っている。しかし、同一材料でもコーティング材料の厚さの影響を大きく受けるなど、相対的な比較は可能であるが、絶対的な比較はできないのが現状である。

そこで、本論文では微小切削装置を用いて、界面をはく離時のエネルギーバランスを考慮することにより、界面強度を定量的に評価する手法を提案する。そして、電子デバイス配線で用いられている、プリント基板上に形成した銅薄膜の界面強度を評価し、本手法の有効性について検討する。また、マルチボディダイナミクスによるはく離過程の数値解析を行い、はく離時の基材、被着材、切刃に作用する力関係を明らかにし、SAICAS法を用いた界面強度評価手法の高精度化に向けた知見を得ることを目的とする。

## 2. 界面強度評価法

**2・1 SAICAS法の原理** SAICAS法は、図1に示すように試料の表面に対して、水平方向と垂直方向に2軸運動する切刃と、検知器として垂直変位計、水平力検知器、垂直力検知器等から構成されている。測定は、試料の表面に切刃を所定の荷重で接触させ、垂直変位をゼロに設定してから、試料表面をスタート点として2軸方向に運動させる。そして、被着材膜内に切り込んだ切刃が界面近傍に達した時点で、切刃を界面に対して平行な1軸運動だけに固定し、垂直運動を停止する(変位制御)か、一定荷重に固定する(荷重制御)ように制御を行う。SAICAS法による被着材のはく離は、切刃を表面から斜めに内部に切り込み、切刃が界面近傍に達すると、被着材が基材から分離し、切削からはく離への転換が発生することによるものである。SAICASによる試験から得られるデータは、試験機に取り付けられた荷重センサからの、切刃の水平力  $F_H$  (切削力あるいは、はく離力) と垂直力  $F_V$  となる。

**2・2 界面強度評価** 本研究では、定常切削時におけるエネルギーバランスを考慮して界面強度評価を行う。図2にモデル図を示す。刃幅を  $w$  とし、単位長さ  $da$  あたりコーティング膜をはく離させるのに必要なエネルギー  $G_a$  は次式で表すことができる。

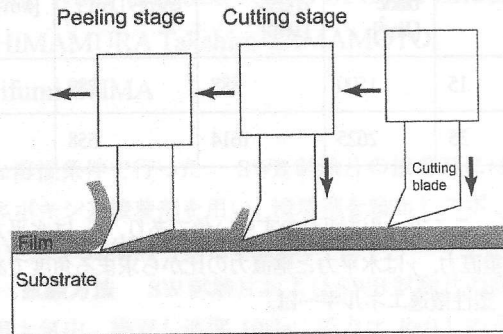


Fig.1 Schematic representation of SAICAS method

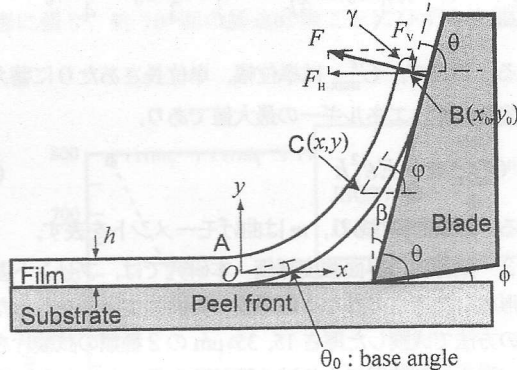


Fig.2 Deformation process of peeled film

$$G_a = \frac{1}{w} \left( \frac{dU_{ext}}{da} - \frac{dU_s}{da} - \frac{dU_{db}}{da} - \frac{dU_{df}}{da} \right) \quad (1)$$

ここで、 $dU_{ext}$  は外力による仕事の変化、 $dU_s$  は弾性ひずみエネルギーの変化、 $dU_{db}$  は塑性変形による塑性散逸エネルギーの変化、 $dU_{df}$  はすくい面摩擦による散逸エネルギーの変化である。はく離が定常的に起こっていると仮定すると、単位長さあたりの界面をはく離に要するエネルギーは、

$$G_a = \frac{1}{w} \left( \frac{dU_{ext}}{da} - \frac{dU_{db}}{da} - \frac{dU_{df}}{da} \right) \quad (2)$$

$$= G_{ext} - G_{db} - G_{df}$$

となる。外力による仕事およびすくい面における摩擦による散逸エネルギーは、それぞれ、

$$G_{ext} = \frac{1}{w} \frac{dU_{ext}}{da} = \frac{1}{w} F \sin \theta = \frac{1}{w} F_H \quad (3)$$

$$G_{df} = \frac{1}{w} \frac{dU_{df}}{da} = \frac{1}{w} (F_V \cos \alpha + F_H \sin \alpha) \quad (4)$$

Table 1 Results of SAICAS tests for copper thin film

Thickness [ $\mu\text{m}$ ]	$F_H$ [N]	$F_V$ [N]
15	1.2	-0.19
35	2.1	-0.29

Table 2 Evaluation results of interfacial strength

Thickness [ $\mu\text{m}$ ]	Work done by blade [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]	Plastic dissipation energy [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]	Frictional dissipation energy [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]	Interfacial strength [ $\text{J}/\text{m}^2$ ]
15	1500	888	289	323
35	2625	1614	558	453

となる。ここで、 $\beta$ は切刃のすくい角であり、 $F_H$ は水平力、 $F_V$ は垂直力、 $\gamma$ は水平力と垂直力の比から求まる角度である。また、塑性散逸エネルギーは、

$$\frac{G_{db}}{G_{\max}^e} = (1 - \chi) \left( k_0 + \frac{1}{3k_0} - 1 \right) + \frac{\chi}{3} k_0^2 - \frac{3}{4} m_0^2 \quad (5)$$

となる。ここで、 $G_{\max}^e$ は単位幅、単位長さあたりに蓄えられる弾性ひずみエネルギーの最大値であり、

$$G_{\max}^e = \frac{1}{2} E \varepsilon_y^2 h \quad (6)$$

となる。 $k$ は曲率であり、 $m$ は曲げモーメントを表す。

2・3 銅薄膜の界面強度評価 本研究では、プリント基板上に形成した厚さの異なる銅薄膜の界面強度評価を行った。同一の方法で成膜した厚さ15, 35  $\mu\text{m}$ の2種類の試験片を用意し、微小切削装置によりはく離試験を行った。なお、用いた刃幅は0.8 mmである。定常はく離時の抵抗力の平均値を表1に示す。これより、膜厚が厚くなるほどはく離段階における抵抗力が大きくなっていることがわかる。また、同一界面を評価しているにもかかわらず、従来用いられていた水平方向の抵抗力で評価した場合、膜厚の違いにより75%の差が生じていることがわかる。次に、本研究で提案している手法で整理した結果を表2に示す。界面強度評価に及ぼす膜厚の影響は、40%の差に縮まっており、水平方向の抵抗力で評価するよりも精度よく評価できていることがわかる。また、エネルギーバランスを考えることにより、外力がする仕事の大部分が塑性散逸エネルギーとして使われ、残りの約半分が摩擦散逸エネルギーとなっていることも分かり、エネルギーの分配の様子を知ることができる。

### 3. マルチボディダイナミクス解析

切刃による被着材の剥離をマルチボディダイナミクスにより解析した。本研究では、アルテアエンジニアリング株式会社のHyperWorks Ver.10に含まれているMotionSolveを利用して解析を行い、可視化にはMotionViewを用いた。解析モデルは、10個の質点を弾性はりで接続することにより薄膜をモデル化し、界面結合力は、被着材に垂直で基材方向の力を各質点にかけることによってモデル化した。実際には、被着材は弾塑性変形を起こすが、今回は弾性変形のみを仮定した。な

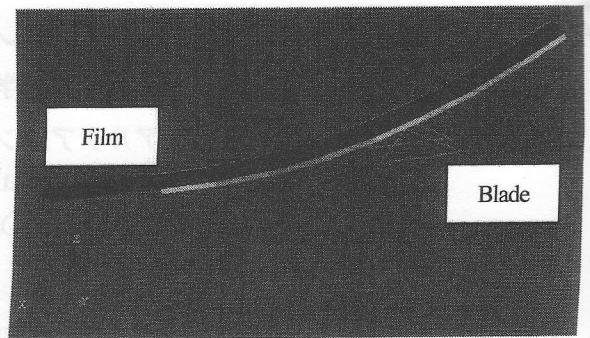


Fig.3 Numerical simulation of SAICAS method

Table 3 Results of Multi-body dynamics simulation

Thickness [mm]	$F_H$ [N]	$F_V$ [N]
0.4	29.2	27.2
0.5	33.3	31.3
0.6	38.1	36.1

お、被着材薄膜のヤング率は70 GPa、幅を1 mm、全長を10 mmとし、各質点の質量をそれぞれ0.01 kgとした。3種類の膜厚0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mmを用意し、切刃角度を45°として解析を行った。また、各質点には基材方向に15 Nの力をかけ界面結合力とした。そして、被着材が基材から0.4 mm離れたところで質点にかかる荷重を0とし、はく離を進展させた。定常はく離時の解析結果を図3に示す。基材と被着材の剥離点と切刃の間にMicrogapを観察できた。表3に、各膜厚における最大荷重をまとめる。これより、膜厚が厚くなるにつれ、切刃が受ける反力も大きくなっていることがわかる。実際のSAICAS法で得られる反力は、水平力 $F_H$ に比べて垂直力 $F_V$ は小さな値となる。これは、はく離において被着材が塑性変形するため、スプリングバック力が小さくなるためである。しかし、本解析では弾性解析を行っているため、大きなスプリングバック力を受ける。そのため、切刃は基材に対して垂直方向の荷重を受けている。今後は、塑性変形も考慮した解析モデルを構築していく必要がある。

### 4. 結言

本論文では、SAICAS法において、界面はく離時のエネルギーバランスを考慮することにより、界面強度を定量的に評価する手法を提案した。そして、そして、プリント基板上に形成した銅薄膜の界面強度を評価した。また、マルチボディダイナミクスによるはく離過程の数値解析を行った。

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、ダイプラウインテンス(株)西山氏より多くの助言をいただいた。また、アルテアエンジニアリング株式会社のアカデミックオープンプログラムにより、HyperWorks Ver.10を使用させていただいた。ここに記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) Nishiyama, I., Japanese patent disclosure, 2003-254894.
- 2) Nishiyama, I., Journal of the Surface Finishing Society of Japan, Vol.58, No.5,(2007),pp.300-303.