

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Machining

Vol. **24A1**
March/2012

マシニング事業

■ 寄稿・論文・報文・解説

「**板材切断変形の観察**」

Development of microscope observation system
for cutting deformation of
laminated-transparent resin sheet

〈キーワード〉 保護膜と延性・層間剥離とすべり・せん断割れ
糊層の流動・速度依存性
隙間と面内引張変形・しわ押さえ

長岡技術科学大学／機械系
准教授 永澤 茂
Shigeru NAGASAWA

要 旨

厚み0.2~0.5mm程の紙や樹脂などの板状複合材の切断加工に関して、面外せん断変形を可視化して観察するため、高精度のダイセットを試作しCCDカメラ等と組み合わせて解析システムを開発した。流れ分布を解析するため2値化手法を採用し、積層異方性の特徴を見出すことができた。板紙ならびに偏光樹脂板の工具隙間に依存する変形挙動を可視化によって抽出した。

Abstract

An analysis system has been developed for visualizing and observing the out-of-plane shear deformation of a composite sheet of paper or plastic with thickness of 0.2 to 0.5 mm. Highly accurate dies were prototyped and CCD camera was installed for the analysis. Digitalization was adopted to analyze the distribution of the deformation and with this method anisotropic characteristics of lamination were found. Deformation behavior that was dependent on a die clearance for a paper-board or polarized plastic sheet was sampled with visualization of this.

1. 背景と観察の必要性

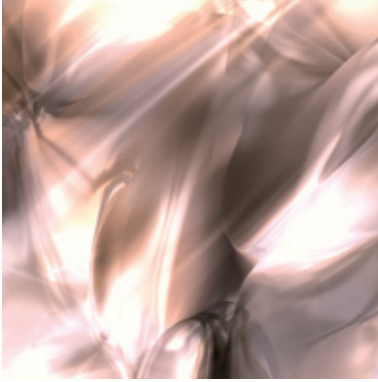
電磁波遮蔽金属箔や液晶樹脂板などの切断加工は、産業界で広く行なわれており、その処理加工技術は、現場の経験知識として蓄積されていることが多い。これらの被加工材は、異質な素材の組み合わせによる複合構造を呈していることが多く、高い延性と同時に亀裂の進展に対する抵抗が小さい（割れやすい）脆性材を組み合わせたり、あるいは糊層のような粘弾性流体を含む不均質な柔軟材であると共に、異方性の強い積層材であることが多い。従って板材の切断は適当にできるとしても、望ましい形状の切口を得ることや、糊の流出を抑制して切断するといった制御性能に関する条件の設定は一般に難しく、経験知識を要する。

このような切断工具の切れ味性能を考える場合、被加工材の構造的な性質や素材が持つ機械的物性を理解し、工具形状と被加工材の変形挙動との関係を知ることが必要である。

切断工具の条件として、刃先の先端角度と逃げ角、表面粗さ、摩擦係数、硬さと耐摩耗性、しわ押さえ機構、工具速度、工具変位と押込量などの因子が考えられる。これに対して、被加工材の特性因子として、保護膜の有無、加工材の異方性と積層構造、糊層の有無、機械的物性による破壊形態の特徴などを挙げることができる。被加工材に対する適正な工具条件と加工条件の選択・設計は、高品質な切断加工処理を行なうために重要である。

このような産業界の需要に対して、板材の精密抜き加工を行なうために、しわ押さえ機構を持つ面外せん断機構のパンチとダイスによる切断加工法がある。この加工方式と並んで、くさび刃と対向面板とを組み合わせた板材の抜き工法が知られている。どちらにも長所と短所がある。

ここでは、前者のパンチとダイスによる面外方向との直交切断貫通式を用いた精密抜き加工法を手段とするとき、樹脂板材の切断現象を解析するための計測評価装置の開発と経過について、事例を交えて紹介する。

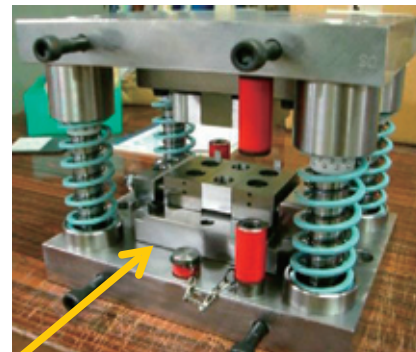


2. 観測装置の開発と評価の方法

樹脂板のせん断加工においては、保護膜の物性が製品樹脂材の物性と比べて顕著に異なる場合が往々にしてあること、糊層のはみ出し流動による工具への付着と切れ味性能の低下、製品樹脂材の切口形状の品質(形状不良、割れ、かえり、切粉生成等)等が問題視されることが多い。これらの加工性能をある条件範囲で達成するためには、刃先隙間や工具速度の調整をして、なおかつ、材料の変形挙動を追跡し観察することが望まれる。このためには、切断部の2次元的な変形の様子を顕微鏡レベルで高速に撮影して観察することが必要である。

Fig.1は、共同研究で試作・開発された2次元せん断試験装置と切断過程をその場観察するためのCCDデジタル顕微鏡を示す。このせん断試験装置は、左右に隙間調整可能なダイブロックを配し、中央に幅25mmの昇降可能な矩形パンチを組み合わせた抜型である。

(b) CCD digital microscope



(a) Die set developed for two dimensional shearing test

Fig.1 Die set and CCD microscope measurement system

Fig.2 (a)は、せん断試験装置の構成を示しており、Fig.2 (b)は、以下で紹介するせん断試験用の試験片(板紙)を例示している。板材の面外垂直方向におけるせん断変形を安定して精密に行なうため、(i)切断部における面内引張りに対して試験片を安定して動かさないようにするため、試験片に対して2カ所の切断線を配した。左右何れかの切断変形を観察することとし、他方は均衡補償用とした。(ii)安定で精密な昇降運動のため、4本の摺動支柱を配した。(iii)薄板の抜き加工で一般に考慮されるしわ押さえ機構として、左右上部のstripper(等価ばね定数:5.8N/mm)と中央下部のlifter(等価ばね定数:

2.0N/mm)を備えた。備えた工具の材質は、SDK-11(硬さ58-60HRC)であり、取付治具と一体形式としている。

本試験装置は、汎用圧縮試験装置に搭載して使用された。このため、押込負荷に対する工具の変位応答は、無視できない機械的不感帯を伴った。これを解消し安定した負荷応答を達成するため、上下型板に対して予圧を与えるコイルばねを支柱に沿って設置した。切断とこの予圧による荷重 F と上型の押込変位 d との計測は、圧縮試験装置内蔵の計測装置によって行なっている。

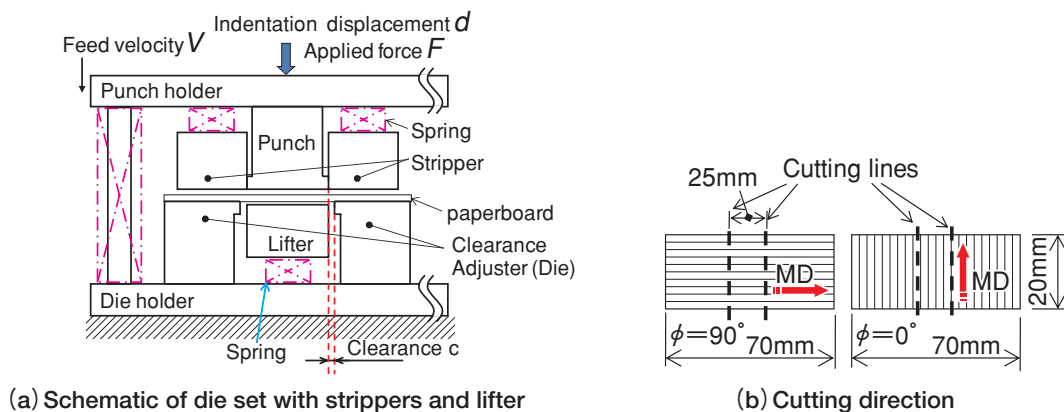


Fig.2 Die set and specimen for shear testing

3. 観察事例

1) 白板紙の面外せん断変形特性

化粧・包装箱などによく使われる厚み0.3~0.6mm程度の板紙は、抄いた紙を6~8層に重ねて貼り合わせた積層構造のものが多い。この板紙を用いた製缶では、一般にくさび刃と面板を使った型抜き工法が用いられているが、型通りに切れた板紙の製品を完全に切り離すため、strippingと呼ばれる作業を行なう。

Strippingは、面外方向へのパンチによる押し出しであり、「つなぎ」と呼ばれる未切断部分においては、

「面外方向への引きちぎり」を生ずる加工になる。従って板紙を用いた包装箱の成形・加工においても面外せん断は、基本的で重要な加工処理方法である。

板紙の積層構造や強い異方性を考慮して、実際に切り離しを適正に行える工具隙間の設定や加工速度の影響を明らかにするため、試験装置によってせん断加工を受ける板紙の側面の様子をCCDビデオカメラによって撮影した写真の例をFig.3 (a)に示す¹⁾。この詳細な内容については文献1)に掲載している。図の右側の欄にあるFig.3 (b)は、画像の

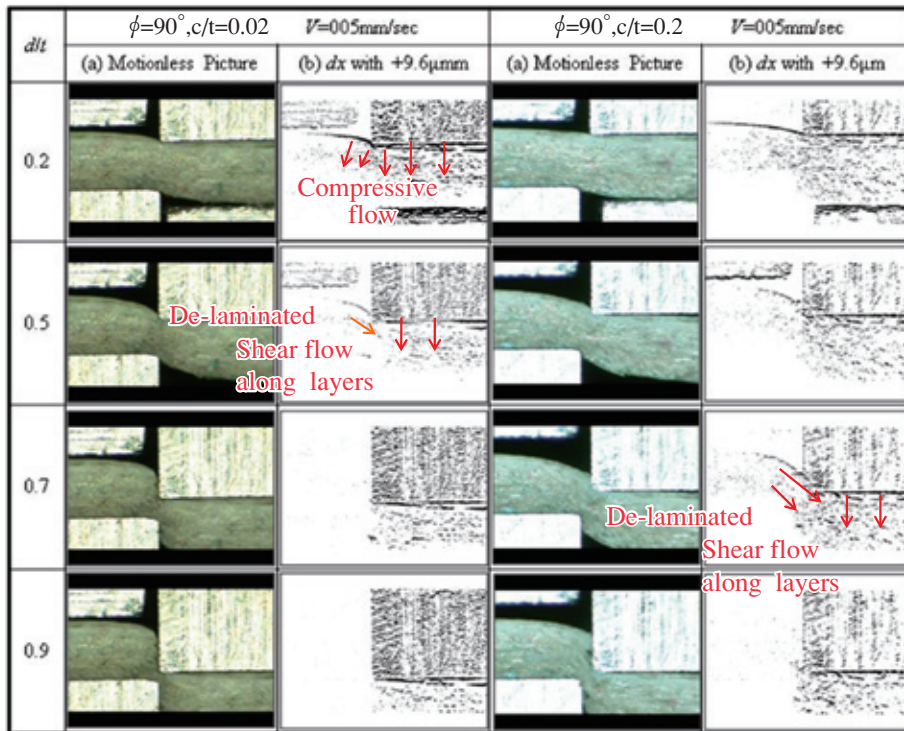


Fig.3 Side views of sheared zone by a CCD camera and Binary-stated deformation flow of paperboard during punch indentation across to grain direction.

差分を2値化処理した結果を示す。ここで用いた白黒の2値化判定は、汎用ライブラリを用いた簡易な処理であり、背景のノイズを消すように考慮された。黒い箇所は相対的に状態変化 (RGB信号) が大きく、白い部分は状態変化が小さい箇所である。

Fig.4は2値化処理の考え方を概念的に示した絵である。工具の押し込み速度が $V=0.05\text{mm/s}$ で時間間隔 0.192s で画像の差分を処理すると、工具の押し込み変位量に換算して $9.6\mu\text{m}$ の工具変位に対する板紙部材の流れ分布の差分をつくることになる。ここで左右のdie blockは静止しているから、die blockに拘束された板紙は白い領域を呈する。中央部の

punchとlifterに挟まれた板紙部材は、punchと等しい速度 V で降下するから、やや灰色に判別される。Fig.3の2値化処理された結果をみると、せん断変形によって、板紙の上層部が下層に対し、層間剥離を生じて面内方向へすべり変形を呈することがわかった。この様子は、ビデオ写真だけでは判別しにくい。積層材のような不均一な部材の変形の特徴を評価するために、2値化処理のような手段が活躍する場合がある。なお、2値化処理による解析は、くさび刃の押し込み加工についても適用されており、変形流れの特徴を見出す手段となっている²⁾。

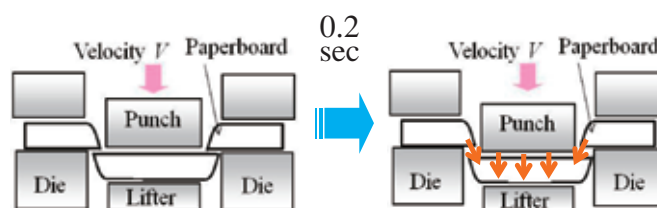


Fig.4 Binary-stated flow analysis with side views of sheared zone by CCD camera

せん断応力 τ と押込変位 d/t との関係、ならびに面外最大せん断応力 τ_{peak} と工具隙間 c/t との関係 (Fig.5)、ならびに工具速度の負荷応答への影響については、文献1)に詳しく紹介している。これらを総括すると次のようである。

工具隙間 c と板厚 t の比が $c/t < 0.1$ のとき、 $\tau_{peak}(90) / \sigma_B(MD) = 1.8 \sim 2.2$ ならびに $\tau_{peak}(0) / \sigma_B(CD) = 3 \sim 3.5$ である。 $\phi = 90^\circ$ である前者の結果は、 42° くさび刃押抜きの表面破断強さ³⁾と比べてやや小さいことがわかった。実験観察の結果を総合的にみて、隙間が $c/t < 0.1$ のように小さいとき、面外最大せん断応力 τ_{peak} は、面内引張強さ(応力) σ_B に依存せず独立しているように見える。しかし一方で、工具隙間が大きいく $c/t > 0.2$ の条件になると、面内引張変形が変形に寄与する割合が大きくなる

と見える。負荷応答の結果からみても、面外最大せん断応力 τ_{peak} は次第に減少していき、面内引張強さ σ_B に収束していく傾向であった。さらに面外最大せん断応力 τ_{peak} は、ひずみ速度 V/t に依存し、ある範囲で増加する傾向があることも観察結果からわかっている。

2) 保護膜付き偏光板のせん断加工特性

調査に供した偏光板については、保護膜と本体との物性が大きく異なることを確認している。板の厚みは次の通り。

上下の保護膜の厚さ0.06mm、偏光板の厚さ0.35mm、
保護膜付き偏光板の全厚さ $t = 0.47$ mm

用いた偏光板は内部に段構造の中層を持つため、充填材で埋められた段構造体と見ることができる。このため、中層の段筋の方位によって機械的な物性が異なる。

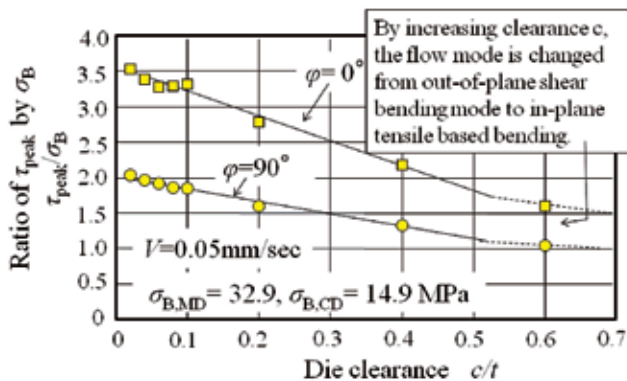
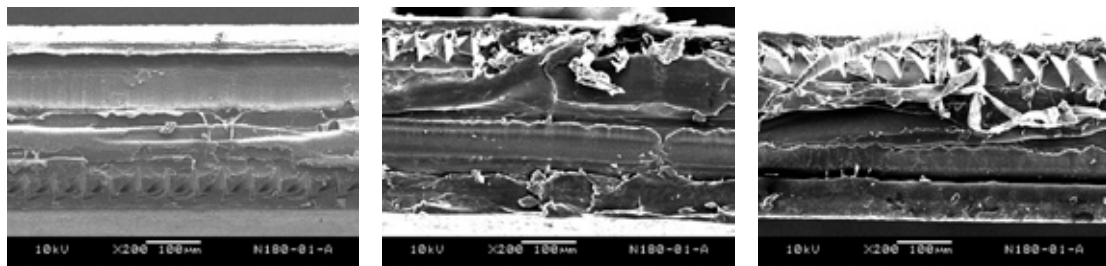


Fig.5 Relationship between peaked shear stress and die clearance



(a) 良好

(b) 若干の引抜け破断

(c) 顕著な引抜け破断

Fig.6 $\phi = 90^\circ$ 方向切断面のSEM写真

Fig.6は、工具隙間 $c=20\mu\text{m}$ 、 $V=0.01\text{mm/s}$ 、 $\phi=90^\circ$ で偏光板を切断した切口面をSEMで撮影した例である。一部に段状構造を確認できる。保護膜または偏光板の一部から数十ミクロン程度の帯状切粉が生成され、切口面に付着することが確認された。また糊層の流動による凹凸面の形成がある。SEMによる観察は、これらの様子を鮮明に把握するために有効であるが、現場の生産工程における簡易診断法に使うことは難しいと思われる。代替の簡易診断法として、CCDカメラとレーザ式顕微鏡を用いた画像処理による評価などから、隆起形状の簡易判定を試みている。

Fig.7とFig.8は、工具隙間を変えたとき($c=10$, $25\mu\text{m}$)の切断部の側面をビデオで撮影した様子である。これらは速度 $V=0.1\text{mm/s}$ における切断部の側面の変形であり、^{※2}切断部中央の変形そのものではないことに注意する。Fig.7とFig.8を比較すると、工具隙間の違いによって次のような特徴がある。

$c/t=0.02$ ($c=10\mu\text{m}$) の場合、 $d/t=0.46$ で上下の刃角部を起点にそれぞれ斜め方向にせん断変形の筋を確認できる。この領域内部において亀裂状のせん断変形が発生していると考えられる。 $d/t=0.67$ まで進行してもその変形模様は消えず、 $d/t=1.0$ においても左側のダイブロックの直上領域に残存した。すなわち、面内方向の引張り変形がほとんど発生しないため、2つの斜め方向の亀裂状の模様はそのまま残存して切断完了となる。

これに対して $c/t=0.05$ ($c=25\mu\text{m}$) のとき、前述の場合と同様に上下の刃角部に対してそれぞれ斜め方向にせん断変形の筋を生ずるが、上下の刃先角部が対角をなす領域では部材が面内引張りを受けて伸長を呈している。

工具隙間を大きくすると、切断部は緩やかなせん断と曲げ変形を呈し、後工程で面内引張りが顕著となることは、板紙の変形観察から伺える。偏光板の変形においては、糊層などの流動によって可視化される内容が不鮮明になりやすいが、傾向としての流動分布は同様と考えられる。

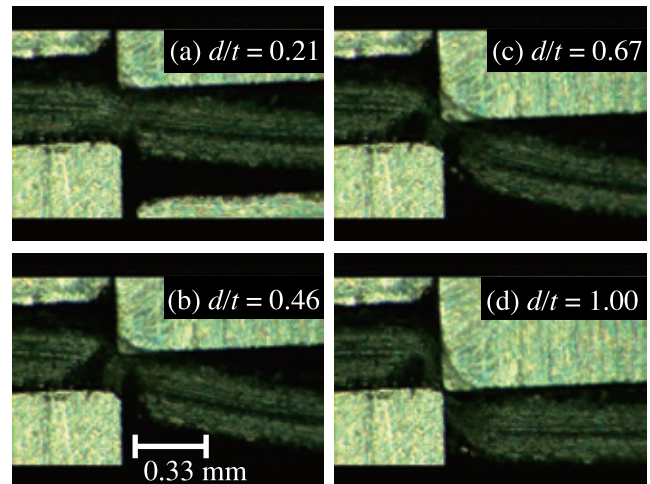


Fig.7 Side views of sheared zone during punching process by a CCD camera in case of $V=0.1\text{mm/s}$, $c/t=0.02$ ($t=0.47\text{mm}$, $\phi=90^\circ$)

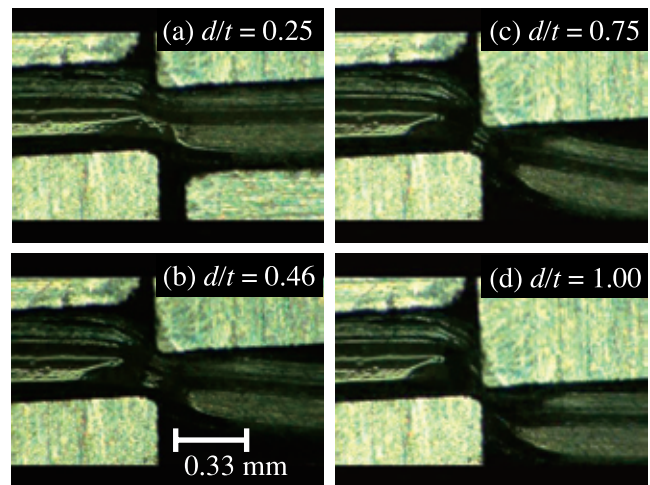


Fig.8 Side views of sheared zone during punching process by a CCD camera in case of $V=0.1\text{mm/s}$, $c/t=0.05$ ($t=0.47\text{mm}$, $\phi=90^\circ$)

4. 開発の裏話

偏光板の切断過程において、板材の変形挙動に及ぼすパンチの降下速度と工具隙間の影響について、切断部側面から撮影した動画からその特徴を観察する試みを行なっている。同一の供試材による比較を行なうことで、さらに鮮明な知見を得られると考える。

構造複合部材をなす保護膜と糊層については、個別にその変形挙動の特徴を解析する必要があると考えている。基礎研究としての単体部材の切断挙動ならびに単純化された保護膜構造、単純化された糊層の機械的性質について、さらに究明する必要がある。

偏光板の構造は段構造体であり、これの切断過程で生成される帯状切粉の現象についても不明なことが多い。今後の追跡が必要である。

構造複合部材としての保護膜付き偏光板の切断挙動については、本提案の可視化手法と高速カメラを使って適度な照明と適度な拡大で観察することによって、実際的な検証を行なうことが可能である。実務的な観点からの簡易手法として今後も活用を期待したい。

5. おわりに

糊層の挙動、樹脂材の粘弾性特性や割れなどを伴う加工技術については、現場での経験知識に基づいて処理されることが多い。これらに対する力学的な挙動の解明はまだ十分ではなく、工具の設計指針や加工条件の最適化などを議論する上で、さらに進展が望まれる。

複合材として複雑な構造を持つ保護膜付きの偏光板だけでなく、板紙の切断特性についてもその機械的な性質の複雑さによって、材料の切断加工特性はまだ不明な部分が多い。このような複雑な変形対象に対して、可視化観察による現象の発見の可能性を示す解析技術の発展は今後も重要であると考えている。

用語解説

- ※1 ここではソフトウェアとしてNational instruments社のLabVIEWを用いた。
- ※2 その意味では板紙の切断でも同様であるが、相対的に板紙では、刃の長手方向にほぼ様な変形を呈することが確認できている。

参考文献

- 1) S. Nagasawa, Y. Yamashita, D. Abdul Hamid, Y. Fukuzawa and A. Hine, OUT-OF-PLANE SHEARING CHARACTERISTICS OF COATED PAPERBOARD, International Journal of Mechanical Sciences, Vol.52 No.9 (2010), [1101-1106].
- 2) 永澤 茂、菊池 一哉、多賀 智治、村山 光博、福澤 康・片山 勇
くさび刃による板紙の切断特性、塑性と加工 Vol.48 No.558 (2007), [650-654].
- 3) S. Nagasawa, D. Yamagata, Y. Fukuzawa, M. Murayama,
Stress analysis of wedged rupture in surface layer of coated paperboard,
Journal of Material Processing Technology, Vol.178 (2006), [358-368].