

# スーパー・ハイテン材の高精度せん断加工に用いる工具の 長寿命化技術の開発

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター 機械技術グループ  
副主任研究員 中村健太  
(平成 23 年度一般研究開発助成 AF-2011027)

キーワード：せん断加工，高張力鋼板，潤滑油

## 1. 研究の目的と背景

近年，自動車用部品を中心に，安全性の向上，軽量化の観点から，高張力鋼板（以下，ハイテン材と称す）の適用が進んでいる．また，ハイテン材は従来の 500MPa 級や 700MPa 級に比べて引張強度が高い 1GPa 級のいわゆるスーパー・ハイテンが出回ってきている．スーパー・ハイテン材の魅力は未処理の生材のまま十分な強度を有することから，一般構造用鋼や数百 MPa 級のハイテンを用いるよりも軽量化できる点や，同一強度を一般構造用鋼で得ようとしたときに必要な熱処理などの後工程を省略することができる点であり，これまで以上に需要が伸びる材料といえる．

一方，ハイテン材のせん断には高精度せん断加工法が用いられており，加工時に問題となるのがパンチの欠け，すなわち工具寿命である．これはハイテン材の最大の特徴である高張力が原因で起きるものである．すなわち，パンチの欠けは，せん断により開放された材料の圧縮応力によってパンチに締付力が作用し，その状態でストリッピングが行われることで凝着が生じ，それが繰り返されることで凝着部を基点として生じると考えられている．このような問題は，引張強度の高いスーパー・ハイテン材では顕著であり，スーパー・ハイテン材のせん断加工を行うには工具寿命の問題を解決させる必要がある．

現在，スーパー・ハイテンを含むハイテン材の高精度せん断加工に用いるパンチの寿命のコントロールには，技術者の経験に基づく研磨が有効とされているが，技術の継承や寿命の定量的な管理が出来ないといった問題がある．潤滑油の側からは，ハイテン材などの難加工材を対象とした高精度せん断加工には活性な添加剤を含んだ潤滑油が用いられており，これらの添加剤の焼却処分プロセスを考えると環境負荷型の加工ともいえる．また，工具へのコーティングは，凝着の防止といった目的から利用されているが，潤滑油との組み合わせによる寿命延長のメカニズムの検討は十分に行われていないと思われる．つまり，一般的には，コーテッド工具と専用潤滑油を組み合わせることで，工具寿命が延長できるとの発想がある．

一方，近年の社会的動向からも，地球環境負荷の小さ

な加工への社会的要求も高まっており，潤滑油に含まれる添加剤の成分も再検討する必要があるように思われる．

そこで，スーパー・ハイテン材の高精度せん断加工においてストリッピング時に生ずる工具への被加工材の凝着と工具のチッピングを抑制するための，低環境負荷型潤滑技術の開発が求められている．

本研究では，工具へのコーティングと低環境負荷型潤滑油を組み合わせることで，スーパー・ハイテン材の高精度せん断加工時の工具寿命を一般構造用鋼の加工時と同程度にしたいとの発想のもと，コーティングの開発とコーテッド工具と無添加油との組合せ効果について検討した．

コーティングには近年ステンレスの無潤滑条件での絞りしごき加工でも実績のあるダイヤモンドライクカーボン（以下，DLC と称す）を採用することとした．しごき加工に関する報告では，DLC を成膜する基材の表面にショットブラスト処理などで凹凸を付与することで密着性が向上するとの報告がある．ところが，DLC は基材の表面形状に沿って表面に成長することから，成膜時に作成した凹凸が成膜後にも残ってしまう．一方，せん断加工においては工具の表面粗さが製品の切口面性状，特に，せん断面に影響を与えることが知られているので，工具表面の粗さを小さくすることが望まれる．そこで，本研究ではまず，基材の表面性状と DLC 膜の耐久性（密着性・耐摩耗性）の関係を調べ，最適成膜条件を検討した．

また，高精度せん断加工に用いられる潤滑油には塩素系添加剤や活性添加剤が処方されており，この添加剤が分解・反応し，焼付き防止性能のある境界潤滑膜を工具表面に形成している．本研究では，その役割をコーティング膜が担うことが出来ると考え，添加剤を含まない潤滑油を用いて，せん断時の加工性を評価した．

## 2. DLC 膜の耐久性評価

### 2.1 表面粗さの調整方法

DLC を成膜する基材の材質は工具鋼 SKD11 で，高温焼き戻し処理を施したものである．試験片は直径 20 mm，厚さ 4 mm の円盤状である．

準備した試験片は 5 種類で，鏡面に仕上げたもの（算

術平均粗さ  $Ra = 0.002 \mu\text{m}$ ), 鏡面に仕上げた試験片を, 粗さの方向性の影響を小さくするためにショットブラスト処理して  $Ra$  の値を  $0.05 \mu\text{m}$ ,  $0.14 \mu\text{m}$ ,  $0.58 \mu\text{m}$  に調整したものである. なお, 投射物や投射時間を変えることで表面粗さを調整した.

## 2.2 DLCの成膜

本研究では, CVD法とPVD法を用いて2種類のDLCを成膜した. いずれの方法でもアルゴンを用いた基材表面のボンバード処理を行った後, 中間層を成膜してからDLCを成膜した. なお, 凹凸を持ったDLC膜を想定して, 表面形状と耐久性を評価するため, それぞれの成膜方法において, 膜厚が  $2 \mu\text{m}$  程度になるようにDLCの成膜時間を調整した.

## 2.3 耐摩耗性

耐摩耗性の評価には, ピンオンディスクタイプのトライボメータを用いた. 測定は荷重を  $10 \text{N}$  から  $60 \text{N}$  まで  $10 \text{N}$  ずつ増大させていくステップロード法により行い, 1荷重条件で  $10$  分間行った. しゅう動速度は  $0.1 \text{m/s}$  とした. ボールにはステンレス鋼 SUS304 を用い, その寸法は直径  $6 \text{mm}$  である.

図1は, 表面の  $Ra$  を  $0.05 \mu\text{m}$  に調整した場合の, CVDによるDLC膜を対象に試験を行った結果であるが,  $1800$  秒付近から摩擦係数が上昇している. この現象は, DLCが摩耗により消失した箇所が金属接触の状態になり, そこでのせん断抵抗が大きくなったためと考えられる. したがって, 摩擦係数が上昇する1つ前の荷重を, 耐摩耗性を示す荷重として評価することとした.

表1には評価結果をショットブラスト処理後の  $Ra$  に対して整理したものを示した. 表より, 表面粗さが小さい方が耐摩耗性に優れることがわかる.

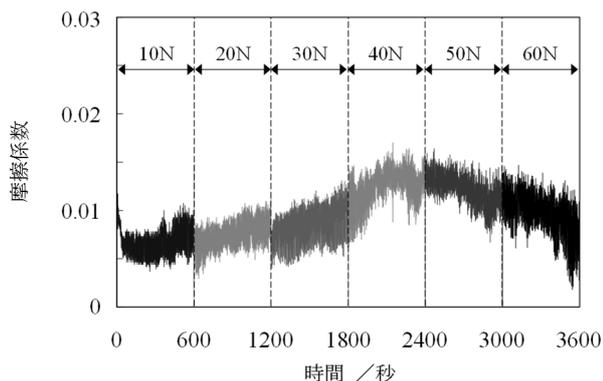


図1 耐摩耗試験の測定例 ( $Ra = 0.05 \mu\text{m}$ )

表1 耐摩耗性と表面粗さの関係

表面粗さ $Ra/\mu\text{m}$	0.002	0.05	0.14	0.58	
耐摩耗性/N	CVD	30	30	<10	<10
	PVD	/	<10	<10	<10

## 2.4 密着性

密着性の評価には, スクラッチテストを用いた. スクラッチテストは, 被測定物にダイヤモンド製の圧子を任意の荷重で押し当て, 圧子を移動させる際に生じる摩擦力やアコースティック・エミッションを定量的に測定する装置である. 測定は, 圧子の移動速度を  $10 \text{mm/分}$  とし,  $1$  分間かけて荷重を  $0.3 \text{N}$  から  $100 \text{N}$  に変化させて行った. 測定項目は, スクラッチ時の摩擦抵抗とスクラッチ面全体の顕微鏡観察とした. 測定は同一の試料に対して2回行い, それぞれ異なった箇所で行った.

測定例を図2に示す. 図は  $Ra$  を  $0.05 \mu\text{m}$  とした場合のCVDによるDLC膜を対象に試験を行った結果であるが, 1箇所目では  $20 \text{N}$  辺りで摩擦係数の上昇が認められる. また, 同図の上段は顕微鏡写真であるが, 摩擦係数が上昇した辺りから, 基材が露呈していることがわかる. したがって, 摩擦係数が急上昇した箇所でDLC膜が剥離したと判断できる. 全ての試験片に対して行った結果を, 表面粗さ  $Ra$  に対して整理したものが表2である. 表中の記号は, 2箇所でも剥離がなければ「○」, 1箇所でも剥離が認められれば「△」, 2箇所でも剥離が認められれば「×」としてある.

つまり, 今回のDLC膜の耐久性の評価の結果と, 従来の研究結果<sup>9)</sup>を組合せて考えると, 基材表面に凹凸を付与した状態でDLCを厚く成膜し, DLC膜を研磨して表面を鏡面に近い状態にすることで耐剥離性・耐摩耗性に優れたDLC膜が成膜できると考えられる.

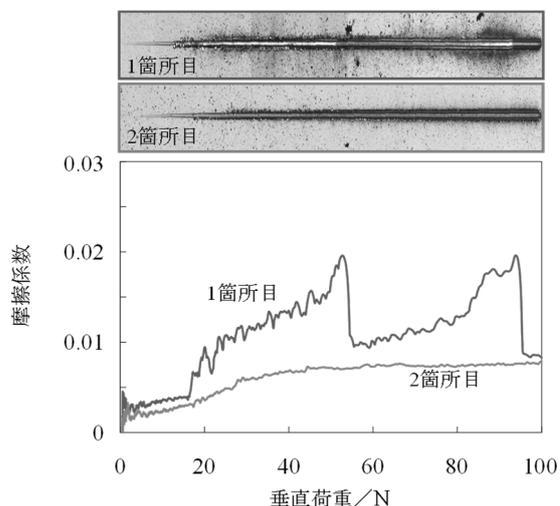


図2 剥離性の測定例 ( $Ra = 0.05 \mu\text{m}$ )

表2 剥離性と表面粗さの関係

表面粗さ $Ra/\mu\text{m}$	0.002	0.05	0.14	0.58	
耐スクラッチ性	CVD	○	△	△	×
	PVD	/	△	×	×

### 3. 精密せん断加工実験

#### 3.1 プレス機および金型

実験にはクランクプレスを用いた。また、金型は図 3

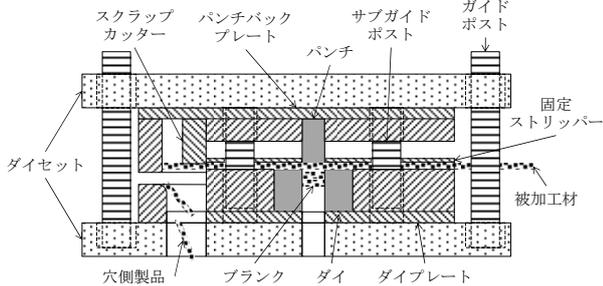


図 3 精密せん断加工用金型の概略図

に示すようなもので、板押えを有さない固定ストリッパタイプの打抜き型を用いた。固定ストリッパはダイの刃先より 1.4mm 高い位置に設置されており、パンチ引抜時に被加工材をパンチから引き離すために組み込んである。パンチはシャープエッジのもので、外径寸法は 10mm、ダイもシャープエッジのもので、内径寸法は 10.02mm とし、クリアランス（片側）がパンチとダイの

公差を含めて 1%未満となるように設計した。クリアランスが極めて小さいために、加工時の工具の位置精度はサブガイドポストにより保証している。

#### 3.2 パンチ、ダイ、加工油、被加工材

パンチの材質は、コーティングを施していないものでは、超硬と SKD11 を使い、コーティングを施したものは、超硬に DLC を成膜したもの、ハイスに TiCN をコーティングしたものを用いた。ここで、DLC は 2 章で得られた結果に基づいて、基材表面にショットピーニング処理を施した後に DLC を成膜し、それを研磨したものを用い、TiCN は市販品を用いた。また、ダイはいずれのパンチに対しても超硬製のものを用いた。

加工油には、活性タイプの硫黄化合物が添加された、非塩素系油（40℃動粘度 120 mm<sup>2</sup>/s）と、動粘度を非塩素系油と揃えた鉱物無添加油の 2 種類を用いた。また、被加工材には 980MPa 級の高張力鋼板を用いた。

実験は加工速度 100spm で、温度に関する管理は積極的には行わず、周囲温度として行った。

#### 3.3 潤滑油添加剤が切り口面性状に与える影響

本実験では、パンチの摩耗に与える潤滑油とコーティングの組合せ効果を調べることを目的としているため、

加工回数	1	100	1,000
切り口面の様子			
加工回数	5,000	10,000	15,000
切り口面の様子			

(a) 現行油（非塩素系）を用いた場

加工回数	1	100	1,000
切り口面の様子			
加工回数	5,000	10,000	15,000
切り口面の様子			

(b) 無添加油を用いた場合

図 4 パンチに超硬を用いた場合の穴側切り口面の様子

加工回数	1	100	1,000
切り口面の様子			
加工回数	5,000	10,000	15,000
切り口面の様子			

(a) 現行油（非塩素系）を用いた場

加工回数	1	100	200
切り口面の様子			
加工回数	5,000	10,000	15,000
切り口面の様子	n.d.	n.d.	n.d.

(b) 無添加油を用いた場合

図 5 パンチに工具鋼（SKD11）を用いた場合の穴側切り口面の様子

評価項目としては、パンチの外径寸法と打抜かれた穴側の切り口面により評価する。

本実験では、まず、基準となる超硬と非塩素系油の組合せによる結果を図 4(a)に示す。なお、加工は紙面の左側からパンチが侵入する方向で行った。切り口面の状態は、いずれの加工回数においても、せん断面と破断面から形成されており、それぞれの加工回数においてせん断面と破断面の割合は同程度である。一方で、加工回数によりせん断面の様子が異なり、加工回数が増えるにつれて加工方向に擦過状痕が認められるようになる。また、非塩素系油と同じ粘度に調整した鉍物油を用いて実験した結果を同図の(b)に示す。せん断面の割合は、いずれの加工回数においても非塩素系油を用いた場合と同程度といえるが、加工方向への擦過状痕に違いがあり、無添加油を用いた場合には、筋状の傷の幅が大きいことがわかる。

ここで、15,000 回加工後のパンチの直径は加工前の直径に比べて 3  $\mu\text{m}$  程度細くなっていた。したがって、擦過条痕が残るせん断面は、加工によりパンチに摩耗が進行するものの、クリアランスが極小なためにせん断面となったために生じたものと推察される。

次に、SKD11 と非塩素系油の組合せによる結果を図 5(a)に示す。切り口面の性状は超硬製のパンチを用いた場合と同じ結果であるが、加工方向への擦過状痕はすべ

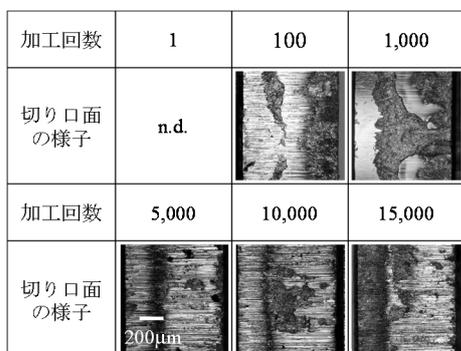


図 6 DLC と無添加油の組合せ時の切り口面の様子

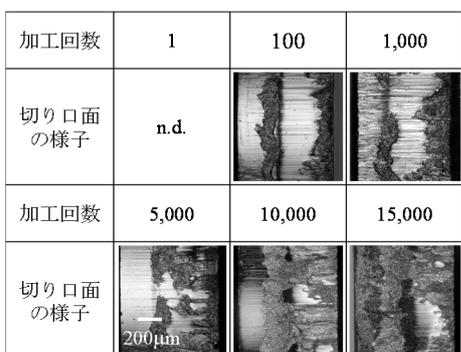


図 7 TiCN と無添加油の組合せ時の切り口面の様子

での加工回数で観察される。なお、加工後のパンチの直径は加工前に比べて 5  $\mu\text{m}$  程度細くなっていた。一方、無添加油を用いた場合には 1 回目の加工から切り口面は荒れた状態となり、200 回の加工でパンチが著しく摩耗したため実験を終了した。

ここで、非塩素系油を用いた場合には、パンチの材質によらず、穴の破断面において腐食のようなものが観察された。つまり、潤滑油により腐食が発生したと考えられ、工具と被加工材間に添加剤由来の反応膜が形成されたことが推察される。そこで、試験後のパンチの刃先を EDS により元素分析を行ったところ、刃先付近では摩耗が進行していたが、刃先よりやや根元寄り潤滑油に由来する元素の分布があった。すなわち、潤滑油に含まれる添加剤に由来する反応膜が形成されたために、切り口面の性状をある程度維持したまま、連続的な加工ができたと推察できる。

### 3. 4 コーティングの効果

2章で述べた方法により DLC をコーティングしたパンチと無添加油を用いて、コーティングによる効果を調べた。図 6 に穴側切り口面の写真を示すが、100 回の加工により破断面が形成されることが分かる。また、2000 回加工時には凹凸の小さな鏡面に近いせん断面は消失しており、擦過状痕が支配的なせん断面となることが分かる。

同様の実験をコーティングの種類を TiCN にしたパンチを用いて行った結果を図 7 に示す。DLC を用いた場合と同様に 100 回の加工により破断面が形成されることが分かる。一方、DLC を用いた場合とは異なり、5,000 回以降では破断面が支配的な切り口面となり、せん断面の割合は小さくなるものの、15,000 回まで凹凸の小さなせん断面が存在するといった傾向があることが分かる。

試験後のパンチを図 8 に示すが、DLC をコーティングした場合、刃先付近の DLC 膜がなくなっていることが分かる。一方、TiCN をコーティングした場合には、膜が残っている。すなわち、今回準備した DLC 膜は 1000 回強の加工により DLC 膜が消失してしまい、基材と被加工材間の摩擦が支配的になり、擦過状のせん断面が形成され、TiCN 膜においてはコーティングが残存しているものの、

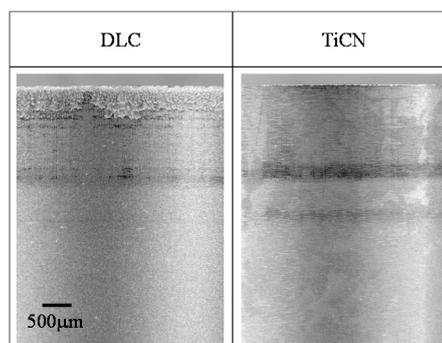


図 8 加工後のパンチの様子

摩耗によりパンチ直径が小さくなることで破断面が成長したものと考えられる。

### 3. 5 コーティングと組み合わせる潤滑油

今回の実験結果より、無添加油であっても工具に DLC を成膜することでスーパー・ハイテン材の精密せん断加工が 1,000 回程度行え、TiCN を成膜することで 15,000 回まで平滑なせん断面が残存する加工が行えることがわかった。つまり、無添加油であってもコーティングにより工具の摩耗を抑制できることが示された。したがって、コーティングを用いた場合には、工具摩耗を抑制する添加剤は少なくすることができ、代わりに、摩擦を小さくすることができる油性剤を添加することが、コーテッド工具を用いた場合の切り口面性状を良くする方策と考えられる。

近年では、自動車用潤滑油に添加されているポリマーに油性剤や極圧剤としての効果があることが見出されている<sup>2)</sup>。ポリマーは水素 H、炭素 C、酸素 O から構成されている物質であり、環境負荷も小さいものといえる。したがって、コーテッド工具とポリマー添加油の組合せ効果についても引き続き検討する必要がある。

## 4. まとめ

工具へのコーティングと低環境負荷型潤滑油を組み合わせることで、スーパー・ハイテン材の高精度せん断加工時の工具寿命を一般構造用鋼の加工時と同程度にしたいとの発想のもと、コーティングの開発とコーテッド工具と無添加油との組合せ効果について検討した結果以下のことがわかった。

- 1) DLC 膜の耐久性を耐摩耗性・密着性の観点から評価したところ、DLC 膜の相手材とのしゅう動面は平滑である必要があることが分かった。
- 2) 超硬をパンチ材料として用いた場合、無添加油との組合せでは、15,000 回の加工において、せん断面比率は現行油（非塩素系油）と同程度であったが、せん断面は工具による擦過条痕が残る切り口面となった。

3) 工具鋼をパンチ材料として用いた場合、現行油（非塩素系油）との組合せでは、15,000 回の加工においてせん断面が支配的な加工が行えたが、無添加油との組合せでは 200 回の加工でパンチが激しく摩耗し、擦過条痕と破断面が混在する切り口面となることが分かった。

4) 1) で得られた知見に基づく DLC を成膜したパンチと無添加油の組合せでは、鏡面のようなせん断面と破断面が混在する切り口面となるが、1,000 回の加工ができることが分かった。また、一般的な TiCN を成膜した工具を用いた場合、DLC を用いた同一加工回数の切り口面に比べてせん断面の割合が高く、コーティングに損傷がない状態で 15,000 回の加工ができることが分かった。

5) DLC 膜や TiCN 膜を用いた場合に得られるせん断面は、コーティングをしていないパンチと現行油との組合せにより得られるせん断面よりも鏡面に近いことが分かった。これは、コーティングの表面粗さに基づく現象と考えられる。

また、本研究では無添加油のみでの評価となったが、油性剤程度の添加剤を含む潤滑油を用いることで、せん断面の支配的な切り口面を得る加工が可能と考えられ、今後の課題とする。

## 謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団（天田金属加工機械技術振興財団）平成 23 年度一般研究開発助成にて実施したものである。記して深甚なる謝意を表す。また、工具の作成に協力いただいた富士ダイス株式会社 春日井氏にも謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 片岡征二・基昭夫・玉置賢次・村川正夫・野口裕之・木原諄二：塑性と加工, 46-532 (2005), 412.
- 2) 中村健太・村木正芳・瀬上高博・鈴木真・山本賢二：トライボロジー会議 2013 秋福岡予稿集, A11, USB.